



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTADES DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

**PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN
CIENCIAS AMBIENTALES**

**EVOLUCIÓN RECIENTE Y ESTADO ACTUAL DEL
APROVECHAMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA
LLANURA DE RIOVERDE, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

M.I. FRANCISCO AGUILAR ORTEGA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. HILARIO CHARCAS SALAZAR

COMITÉ TUTELAR:

DR. JUAN ROGELIO AGUIRRE RIVERA

DR. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P.

SEPTIEMBRE DE 2010



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTADES DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN
CIENCIAS AMBIENTALES

EVOLUCIÓN RECIENTE Y ESTADO ACTUAL DEL APROVECHAMIENTO
DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA LLANURA DE RIOVERDE, SAN LUIS
POTOSÍ, MÉXICO

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

M.I. FRANCISCO AGUILAR ORTEGA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. HILARIO CHARCAS SALAZAR

COMITÉ TUTELAR:
DR. JUAN ROGELIO AGUIRRE RIVERA
DR. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P.

AGOSTO DE 2010



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTADES DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN
CIENCIAS AMBIENTALES

EVOLUCIÓN RECIENTE Y ESTADO ACTUAL DEL
APROVECHAMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA
LLANURA DE RIOVERDE, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

M.I. FRANCISCO AGUILAR ORTEGA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. HILARIO CHARCAS SALAZAR

SINODALES:

PRESIDENTE:

DR. HILARIO CHARCAS SALAZAR

SECRETARIO:

DR. JUAN ROGELIO AGUIRRE RIVERA

VOCAL:

DR. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA

DR. JOSÉ LUIS FLORES FLORES

DR. GERMÁN SANTACRUZ DE LEÓN

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P.

SEPTIEMBRE DE 2010

PROYECTO REALIZADO EN:

EI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE ZONAS DESÉRTICAS QUE PARTICIPA EN EL PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

CON FINANCIAMIENTO DE:

FONDO DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ, BAJO EL PROYECTO “EVALUACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE CONDUCCIÓN Y APLICACIÓN Y SU IMPACTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL VALLE DE RIOVERDE, S.L.P.”, PROYECTO C05-FAI-10-29.49

**CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT)
BECA-TESIS (CONVENIO NO. 190669)**

EL DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES ESTÁ INCLUIDO EN EL PADRÓN NACIONAL DE POSGRADOS DEL CONACYT.

A g r a d e c i m i e n t o s

A Instituciones:

Al Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Al Centro de Estudios Multidisciplinarios de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Institución que me brindó las facilidades para la realización de mis estudios de doctorado.

A personas:

Dr. Hilario Charcas Salazar, el cual aceptó la dirección de mi tesis doctoral. Agradezco sus enseñanzas durante mis estudios doctorales.

Dr. Juan Rogelio Aguirre Rivera, quién formó parte importante de mi comité tutelar, y gran estimulante para mi graduación. Agradezco su apoyo y confianza.

Dr. Javier Castro Larragoitia, parte de mi comité tutelar. Agradezco la revisión de la tesis doctoral.

Dr. José Luis Flores Flores, quién amablemente me instruyó y asesoró en el análisis multivariable, así como en la revisión parcial de la tesis doctoral. Agradezco su apoyo, en cada una de las actividades de realizadas.

Dr. Germán Santacruz de León, quien amablemente aceptó ser lector externo de la tesis doctoral.

Dr. Javier Fortanelli Martínez, por sus observaciones y comentarios.

Dr. Israel Velasco Velasco, por sus observaciones, comentarios y ayuda en la búsqueda bibliográfica.

M.C. Hugo Magdaleno Ramírez Tobías, por su apoyo en la realización de encuestas y trabajo de campo.

Ing. Fernando Carlín Castelán, por su apoyo en el manejo del programa de cómputo PC-Ord.

M.C. Jessica Gretel Valdez, por su apoyo en la estandarización de la información y manejo del programa de cómputo PC-Ord.

Psicóloga María Azucena Herrera Hernández, por su gran apoyo en la captura de la encuesta.

Agricultores de Rioverde, quienes proporcionaron la información necesaria para la realización de esta tesis doctoral.

A las personas que involuntariamente haya omitido

D e d i c a t o r i a s

In memoriam: Lydia Ortega de Aguilar y Eduardo Aguilar Rodríguez.

A mis hijos: Juan Francisco, Emmanuel Alejandro y Alba Giselle. Por ese gran apoyo, por esos momentos de alegría, por ser una gran esperanza, sigamos en el camino.

A mi esposa: María Azucena, por ser copartícipe, sustento y soporte, en esos momentos difíciles,por convivir con mis defectos, por escuchar mis pensamientos,por comprender mis sueños,.....por esos pequeños instantes de alegría,por esos anhelos compartidos,por esa soledad acompañada,..... gracias.

A mis hermanas y hermanos: María del Rocío, Verónica, Eduardo, Lidia, Víctor Hugo, Mayela Isabel y Alejandra

A mis colegas de la Universidad Autónoma de Zacatecas.

Resumen General

La llanura de Rioverde se ubica en la porción suroeste del estado de San Luis Potosí, comprende principalmente a los municipios de Cerritos, Villa Juárez, Ciudad Fernández y Rioverde. En la llanura, el clima varía del seco semicálido al semicálido subhúmedo.

Geográficamente la llanura de Rioverde se divide en dos valles:

i) Valle de Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá); sus aguas subterráneas están localizadas en dos acuíferos, el primero, superficial, en materiales sedimentarios calizos e ígneos, con una extracción estimada de 5.70 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$; el segundo, profundo, en rocas calizas de la formación El Doctor y yesos de la formación Guaxcamá, con una extracción estimada en 0.40 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$. En este valle brotan nueve manantiales, entre los que destaca Puerta del Río. De acuerdo con la hidrogeología de los acuíferos superficial y profundo, se considera que la extracción es menor a la recarga. Las calidades de las aguas del acuífero superficial corresponden a los grupos geoquímicos bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas, y las del profundo a sulfatadas cálcicas. La extracción del agua se realiza mediante 108 pozos profundos, destinados principalmente para uso agrícola (96 %) para el riego de 1334 ha, en donde se produce principalmente maíz para grano intercalado con frijol. El agua se conduce mediante canales sin revestir, y se aplica por gravedad; lo anterior, implica baja eficiencia en la conducción y en la aplicación.

ii) Valle de Rioverde; sus aguas subterráneas se encuentran en dos acuíferos, el primero, superficial, constituido por materiales ígneos y sedimentarios, con una extracción estimada de 74 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$; el segundo, profundo, en rocas calizas de la formación El Doctor. En este valle brotan 20 manantiales, entre los que destaca la Media Luna con un caudal de $4.0 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. De acuerdo con la hidrogeología, el acuífero superficial, se considera con una extracción mayor a la recarga, y para el profundo se desconoce. Las calidades de las aguas del acuífero superficial corresponden principalmente en la zona sur al grupo bicarbonatadas cálcicas y en la zona norte a las sulfatadas cálcicas, y la del profundo al grupo sulfatada cálcica. La extracción del agua se realiza mediante 1271 pozos, principalmente para uso agrícola (98%) para el riego de 7000 ha, destinadas a la producción principalmente de maíz para elote, hortalizas y naranja. El agua se conduce mediante canales revestidos y sin revestir, y se aplica por gravedad; lo que implica baja eficiencia en la conducción y aplicación. El uso ineficiente del agua en las áreas agrícolas irrigadas, es una de las principales causas de una mayor extracción del agua subterránea, la cual excede a la recarga natural. Asimismo, el aprovechamiento intenso realizado en estas áreas agrícolas, principalmente en la zona sur, está generando un desequilibrio generalizado debido a una extracción que probablemente sobrepasa la recarga natural, con los efectos siguientes: i) descenso del nivel freático general y profundización de los niveles de bombeo; ii) reducción del caudal de la

mayoría de los manantiales y desaparición de algunos; y iii) disminución del caudal del río Verde, con daño al hábitat de la fauna y flora subacuática y ribereña.

Con base en lo anterior, el objetivo general del presente trabajo es plantear una estrategia de aprovechamiento racional del agua subterránea en la porción sur de la llanura de Rioverde, que contemple alternativas tecnológicas y administrativas, así como la optimización de los sistemas agrícolas. Para alcanzar el objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- 1) Recopilar y analizar la información histórica de los datos del conocimiento y aprovechamiento del agua subterránea en las áreas agrícolas pertenecientes a la llanura de Rioverde.
- 2) Reconocer y jerarquizar los factores que influyen en el aprovechamiento del agua subterránea para uso agrícola y sus implicaciones en el abatimiento del nivel freático en la porción sur de la llanura de Rioverde (valle de Rioverde).

Para alcanzar el primer objetivo, se ordenaron y sintetizaron las características más relevantes de la hidrogeología y del aprovechamiento del agua subterránea, a partir de estudios hidrológicos, de censos agrícolas y de población. Los resultados muestran que el abatimiento provocado por la extracción del agua subterránea mediante pozos, trajo como consecuencia acciones tales como la desaparición y la reducción de caudales de manantiales; esta conexión hidrológica en la llanura de Rioverde, conformada por el Valle

de Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá) y Valle de Rioverde se le puede considerar como un sistema hidrológico regional.

Para alcanzar el segundo objetivo se realizó el siguiente procedimiento:

i) recopilar y analizar información censal y de archivos sobre el aprovechamiento del agua subterránea del valle de Rioverde; ii) realizar una encuesta entre agricultores propietarios de pozos. La información censal y de archivos se sintetizó en cuadros. La información de la encuesta se analizó mediante estadística multivariable. Los resultados indican que el aprovechamiento del agua subterránea se puede caracterizar con las variables aplicación del agua y patrón de cultivos. Asimismo, los agricultores se pueden agrupar con base en su actitud hacia la adopción de normas que regulan la extracción, en la implementación de tecnologías para la extracción y aplicación del agua y en la transformación de sus patrones de cultivos.

De acuerdo con los resultados anteriores se estuvo en posibilidad de proponer acciones para conformar una estrategia de aprovechamiento racional del acuífero superficial.

General Summary

The Rioverde plain is located in the southwestern portion of San Luis Potosi state, mainly comprising the municipalities of Cerritos, Villa Juarez, Ciudad Fernández and Rioverde. In the plain, the climate varies from dry semi-hot to semi-hot sub-humid

Geographically the Rioverde plain it divided into two valleys:

i) Cerritos Villa-Juárez (Guaxcamá) valley; their groundwater are located in two aquifers, the first, shallow, in calcareous sedimentary and igneous materials, with an estimated extraction of 5.70 million of $\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$, the second, deep, in the limestone formation El Doctor and gypsum of formation Guaxcamá, with an estimated extraction of 0.40 million $\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$. In this valley emerge nine springs, among most notably Puerta del Río. According to the hydrogeology of the superficial and deep aquifers, it is considered that the extraction is less than the recharge. The qualities of the waters of the shallow aquifer belong to geochemical groups calcium bicarbonate and calcium sulfate, and the calcium sulfate from the deep. The water extraction is performed by 108 deep wells, mainly for agricultural use (96%) for irrigation of 1334 ha, which produces mainly for grain maize intercropped with beans. The water is channeled through unlined canals, and applied by gravity; the previous, implies low efficiency in the conveyance and the application.

ii) Rioverde Valley; their groundwater are located in two aquifers, the first, shallow, composed of igneous and sedimentary rocks, with an estimated extraction of 74 million $\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$; the second, deep, in the limestone rocks of the formation El Doctor. In this valley emerge 20 springs, among most notability the Media Luna with a flow rate of $4.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. According to the hydrogeology, the shallow aquifer is considered with a higher extraction to recharge, and the depth is unknown. The qualities of the waters from the shallow aquifer are mainly calcium bicarbonate group in the south and calcium sulfate in the north, and for

the deep to the calcium sulfate group. The water extraction is done by 1271 wells, mainly for agricultural use (98%) for irrigation of 7000 ha, mainly for the production of corn, vegetables and orange. The water is conveyance through channels lined and unlined, and is applied by gravity, which implies low efficiency in the conveyance and the application.

Inefficient use of water in the irrigated agricultural areas is a major cause of increased groundwater extraction, which exceeds the natural recharge. Also, the intensive use made in these agricultural areas, mainly in the south, are generating a widespread imbalance due to extraction that probably exceeds the natural recharge, with the following effects: i) general decline in water table levels and deepening pumping; ii) reduction of the flow of most streams and disappearance of some, and iii) decrease the flow of the Verde river, with damage to wildlife habitat and riparian flora and underwater.

Based on the foregoing, the principal aim of this work is to propound a strategy for rational use of groundwater in the southern portion of the Rio Verde plain, which includes technological, and management alternatives, and the optimization of agricultural systems. To achieve the principal aim, we proposed the specific objectives:

i) Compile and analyze historical data information of knowledge and exploitation of groundwater in agricultural areas belonging to the Rioverde plain.

ii) Recognize and prioritize the factors influencing exploitation of groundwater for agricultural use and its implications in the depletion of phreatic level of the south portion of the Rioverde valley.

To achieve the first goal, were ordered and synthesized the major characteristics from hydrogeology and groundwater exploitation, based on hydrological studies and agricultural and population census. The results show that the depletion caused by the extraction of groundwater through wells, resulted in the disappearance and reduced flows from springs; this hydrological connection in the Rioverde plain, can be considered as a regional water system, consisting of two subsystems Cerritos-Villa Juarez (Guaxcamá) Valley and Rioverde Valley.

To achieve the second objective was done the following procedure: i) compile and analyze census data and files on the use of groundwater in the valley of Rioverde; ii) conduct a survey among farmers owning wells. The census information and files are summarized in tables. The survey information was analyzed using multivariate statistics. The results indicate that the use of groundwater can be characterized by variable water application and crop pattern. Farmers also can be grouped based on their attitude towards the adoption of rules governing the collection, in the implementation of technologies for the identification and implementation of water and changing their cropping patterns.

According to the above results was in a position to propose actions to form a rational strategy from the shallow aquifer.

Contenido

	Índice	Pág. i
	Índice de cuadros	iii
	Índice de figuras	iv

Índice

		Pág.
1	Introducción general	1
1.1	Literatura citada	10
2	Evolución reciente del aprovechamiento del agua subterránea de la llanura de Rioverde, San Luis Potosí, México	13
	Resumen	13
	Abstract	14
2.1	Introducción	15
2.2	Materiales y métodos	19
2.3	Resultados y discusión	20
2.3.1	Evolución de los estudios hidrogeológicos	20
2.3.1.1	Periodo de 1888 a 1902	20
2.3.1.2	Periodo de 1902 a 1950	21
2.3.1.3	Periodo de 1950 a 2005	26
2.3.2	Aprovechamiento del agua subterránea	42
2.3.2.1	Valle de Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá)	42
2.3.2.2	Valle de Rioverde	44
2.4	Conclusiones	50
2.5	Literatura citada	54
3	Estado actual del aprovechamiento del agua subterránea de la llanura de Rioverde, San Luis Potosí, México	59
	Resumen	59
	Abstract	60
3.1	Introducción	61

3.1.1	Descripción del área de estudio	66
3.1.1.1	Clima	66
3.1.1.2	Suelos	67
3.1.1.3	Vegetación	67
3.1.1.4	Geología	68
3.1.1.5	Hidrología subterránea	72
3.2	Materiales y métodos	75
3.3	Resultados y discusión	77
3.3.1	Evolución del aprovechamiento del agua subterránea	77
3.3.1.1	Censo de 1966	77
3.3.1.2	Censo de 1988	79
3.3.1.3	Censo de 2003	79
3.3.2	Evolución del área irrigada	80
3.3.2.1	Periodo de 1950 a 1970	81
3.3.2.2	Periodo de 1970 a 1984	81
3.3.2.3	Situación actual	83
3.3.3	Encuesta a los agricultores propietarios de pozos	84
3.3.4	Caracterización de los agricultores propietarios de pozos mediante su ordenación con componentes principales y su clasificación con el TWINSPAN	88
3.3.4.1	Ordenación	88
3.3.4.2	Clasificación	93
3.4	Conclusiones	99
3.5	Literatura citada	101
4	Discusión general	108
4.1	Literatura citada	117
5	Conclusiones generales	121

Índice de figuras

	Pág.	
Figura 1	Pozos y manantiales de la llanura de Rioverde, San Luis Potosí, México	16
Figura 2	Zona probable de aguas brotantes del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México (adaptado de Paredes, 1909)	25
Figura 3	Pozos y manantiales del valle de Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá), San Luis Potosí, México (adaptado de Medina, 1966)	29
Figura 4	Distribución geográfica de las aguas subterráneas según su potabilidad, en los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández, San Luis Potosí, México	30
Figura 5	Distribución de las clases de agua de pozos y manantiales del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México (Charcas <i>et al.</i> , 2002)	38
Figura 6	Pozos y manantiales en las porciones norte y sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México (adaptado de Charcas, 2002)	63
Figura 7	Formaciones geológicas de la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México (adaptado de labarthe <i>et al.</i> , 1989 y Montañes, 1992)	69
Figura 8	Ordenación de 85 agricultores y diez variables de la agricultura de riego en la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México, sobre los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2)	90
Figura 9	Ordenación de las diez variables de la agricultura de riego en al porción sur del valle de de Rioverde, San Luis Potosí, México, sobre los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) (Hagrave: superficie irrigada por gravedad; Hamicro: superficie irrigada por microaspersión; Hagoteo: superficie irrigada por goteo; Tbomba: tipo de bomba; ProfPozo: profundidad del pozo; Sperenn: superficie con naranja; Shorta: superficie con hortalizas; Ha_M: superficie con maíz)	91
Figura 10	Clasificación mediante TWINSpan de las variables que constituyen el aprovechamiento del agua subterránea, según 85 agricultores de la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México	94
Figura 11	Clasificación mediante TWINSpan de 85 agricultores, con base en las variables que constituyen el aprovechamiento del agua subterránea, de la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México	95

Índice de cuadros

	Pág.
Cuadro 1 Evolución de las características generales de los pozos y su equipamiento en la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México	78
Cuadro 2 Evolución reciente de la agricultura de riego en la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México	82
Cuadro 3 Caracterización general de la agricultura de riego en la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México, con base en una encuesta a 85 agricultores propietarios de pozos	85
Cuadro 4 Importancia relativa de las diez variables de la agricultura de riego en la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México, dentro de los tres primeros componentes principales	89
Cuadro 5 Clasificación jerárquica de atributos de pozos y agricultores mediante TWINSpan de la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México	96

Hallábase el agua en su elemento el soberbio mar, cuando tuvo deseo de subir por los aires y atendida por el elemento del calor se elevó en sutil vapor, tan ligero que tenía la sutileza del aire; subiendo a lo más alto llegó hasta dónde el aire es más liviano y frío y allá la abandonó el calor. Sus minúsculos granitos de hielo se juntaron y pesaron más y al pesar cayeron. La soberbia del agua se transformó en huida del cielo, al caer fue bebida por la tierra seca y ahí estuvo mucho tiempo encarcelada, haciendo penitencia por su culpa.

Leonardo Da Vinci
(1452-1519)

1 Introducción general

En la presente investigación se estudia la transformación y las características actuales del aprovechamiento del agua subterránea de la llanura de Rioverde, San Luis Potosí, México. La llanura de Rioverde se ubica entre los meridianos $99^{\circ} 46' 26''$ y $100^{\circ} 21' 15''$ al oeste de Greenwich y entre los paralelos $21^{\circ} 47' 17''$ y $22^{\circ} 30' 38''$, con una altitud promedio de 1000 m. Esta llanura abarca principalmente a los municipios de Cerritos, Villa Juárez, Ciudad Fernández y Rioverde; sus límites naturales son: al noroeste, las sierras La Noria y El Tablón; al suroeste, las sierras El Jabalí, San Diego y Cieneguilla; al noreste, la sierra Cordón de San Francisco; y al sureste, la sierra La Lágrima (INEGI, 2006). En la llanura, el clima presenta un gradiente climático de norte a sur, que va del seco semicálido al semicálido subhúmedo. En el norte, los valores de precipitación, evapotranspiración y temperatura medias anuales son 396.8 mm, 1277 mm y 21.5°C , respectivamente; en el centro, los valores de precipitación, evapotranspiración y temperatura

medias anuales son de 484.9 mm, 1283.3 mm y 20.9°C, respectivamente; y en el sur, los valores de precipitación, evapotranspiración y temperatura medias anuales son de 880.2 mm, 1222.3 mm y 18.2 °C, respectivamente. En general, el régimen de precipitación es de verano y abarca de junio a septiembre, meses que coinciden con el periodo caliente del año; asimismo, el déficit medio anual de precipitación varía de 880.2 a 342.1 mm (Campos, 1993; García, 1988). Estas condiciones climáticas, explican, el porqué la recarga natural que alimenta a los acuíferos se sitúa en las sierras circundantes a la llanura.

Geográficamente la llanura de Rioverde se divide en dos valles:

i) Valle de Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá); sus aguas subterráneas están localizadas en dos acuíferos, el primero, superficial, en materiales sedimentarios calizos e ígneos, con una extracción estimada de 5.70 millones de m^3 año⁻¹; el segundo, profundo, en rocas calizas de la formación El Doctor y yesos de la formación Guaxcamá, con una extracción estimada en 0.40 millones de m^3 año⁻¹. En este valle brotan nueve manantiales, entre los que destaca Puerta del Río. De acuerdo con la hidrogeología de los acuíferos superficial y profundo, se considera que la extracción es menor a la recarga. Las calidades de las aguas del acuífero superficial corresponden a los grupos geoquímicos bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas, y las del profundo a sulfatadas cálcicas. Con base en las características físicas y químicas, las aguas del acuífero superficial son apropiadas para uso agrícola y

doméstico, y las del profundo sólo para uso agrícola. La extracción del agua se realiza mediante 108 pozos profundos, destinados para uso: I) Agrícola, con alrededor de 104 pozos profundos (el 96%), para el riego de 1334 ha, en donde se produce maíz para grano intercalado con frijol, en rotación con chile y jitomate; el agua se conduce mediante canales sin revestir, y se aplica por gravedad, mediante surcos; lo anterior, implica baja eficiencia en la conducción y en la aplicación, con valores entre el 80 y 60%, respectivamente. II) Doméstico, con aproximadamente cuatro pozos profundos (el 4% restante), para una población rural y urbana de 32000 habitantes, la cual ha propiciado una conurbación de las ciudades de Cerritos y Villa Juárez y de pequeños asentamientos humanos dispersos. Las características principales de esta conurbación son: a) el suministro de agua por bombeo directo a la red de distribución, lo cual incrementa los costos de bombeo y magnifica las fugas en la red; b) la ausencia de medición en los pozos y en las tomas domiciliarias, lo cual impide el conocimiento preciso de la magnitud de las fugas y del agua que se suministra, de tal manera que es difícil calcular el costo real por unidad de volumen entregada; y c) la ausencia de saneamiento de las aguas residuales, lo cual impide su reutilización, ya sea por el sector agrícola o el industrial (SRH, 1973; CNA, 1983; INEGI, 1994; INEGI, 2002; INEGI, 2006).

ii) Valle de Rioverde; sus aguas subterráneas se encuentran en dos acuíferos, el primero, superficial, constituido por materiales ígneos y sedimentarios, con una extracción estimada de 74 millones de m^3 año⁻¹;

el segundo, profundo, en rocas calizas de la formación El Doctor. En este valle brotan 20 manantiales, entre los que destaca la Media Luna con un caudal de $4.0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. De acuerdo con la hidrogeología del acuífero superficial, se considera que existe una extracción mayor a la recarga, y para el profundo se desconoce su balance (SARH, 1979; Charcas *et al.*, 2002; INEGI, 2002). La calidad del agua del acuífero superficial corresponde principalmente al grupo bicarbonatadas cálcicas, esto es, apropiadas para uso agrícola y doméstico, la del acuífero profundo pertenece al grupo sulfatada cálcica, apropiada sólo para uso agrícola. La extracción del agua se realiza mediante 1271 pozos, para uso: i) Agrícola, con alrededor de 1250 pozos (el 98%) del total, para el riego de 7000 ha, destinadas a la producción principalmente de maíz para elote, en rotación con jitomate, chile, tomate y calabacita, como cultivos anuales, y la naranja, mandarina y alfalfa, como cultivos perennes. El agua se conduce mediante canales revestidos y de tierra, y se aplica por gravedad en surcos y amelgas en los cultivos anuales y cajetes en los frutales; lo anterior implica baja eficiencia (SRH, 1973; Charcas, 2002). II) Doméstico, con aproximadamente 21 pozos (el 2% restante), para una población urbana y rural de 120000 habitantes, la cual conforma la conurbación de las ciudades de Rioverde, Ciudad Fernández y El Refugio, y pequeñas comunidades dispersas. Las características principales de esta conurbación son: a) el suministro de agua por bombeo directo a la red de distribución, lo cual incrementa los costos de bombeo y magnifica las

fugas en la red, y el suministro de agua por bombeo a un tanque de regulación y gravedad a la red, con una regulación deficiente, lo cual provoca la necesidad de turnos en el suministro; b) la extracción insuficiente, sobre todo en la época de seca, cuando los turnos llegan a tardar semanas en algunas colonias de la periferia de las ciudades; c) la medición deficiente en los pozos y en las tomas domiciliarias, lo cual impide el conocimiento preciso del volumen suministrado y perdido, de tal manera que se desconoce el funcionamiento hidráulico en las redes de distribución; y d) la ausencia en el saneamiento de las aguas residuales, lo cual impide su reutilización, ya sea por el sector agrícola o el industrial, pues son vertidas directamente al río Verde (CNA, 1996; SEGAM, 2000).

Actualmente, los programas de apoyo a la tecnificación del campo están promoviendo la instalación de tubería para la conducción del agua de riego, con eficiencias del 96 %, así como sistemas de riego por goteo en maíz y hortalizas, y microaspersión en cítricos; estas tecnologías presentan una eficiencia de aplicación del agua alrededor del 90% (SRH, 1973; de la Cruz y Peña, 1994; Rendón y Fuentes, 1997). Lo anterior, permite disminuir la extracción de agua y el costo por bombeo, e incrementa la eficiencia de aplicación de los productos agroquímicos, lo cual repercute en el incremento de la rentabilidad de los diferentes sistemas de producción (Gómez, 1988; de la Cruz y Peña, 1994); sin embargo, el uso de estos sistemas también puede traer como consecuencia el aumento en el uso de insecticidas que pueden

constituir una fuente de contaminación del ambiente (Planner, 1999), así como la ampliación de la superficie irrigada, sin que ocurra una reducción neta en la extracción del agua. Simultáneamente, para mejorar el abastecimiento de agua a las poblaciones humanas, se han estado realizando diversas acciones, como son la rehabilitación de los tanques de regulación y de las redes de distribución, lo cual permite reducir las fugas, asimismo, la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual permitirá intercambiar agua subterránea para otros usos por agua tratada (CNA, 1996).

El uso ineficiente del agua en las áreas agrícolas irrigadas y por las ciudades y comunidades, es una de las principales causas de una mayor extracción del agua subterránea, la cual excede a la recarga natural. Además, se prevé un crecimiento de la población urbana, lo cual permite anticipar un escenario caracterizado por conflictos por este recurso entre los usuarios agrícolas y urbanos, en donde ambos argumenten sus respectivos derechos (de la Cruz y Peña, 1994; Román, 2003).

El aprovechamiento del agua subterránea de la llanura de Rioverde, realizado tanto por los usuarios de las áreas agrícolas como por la población urbana y rural, está generando un desequilibrio generalizado debido a una extracción que probablemente sobrepasa la recarga natural, con los efectos siguientes: i) descenso del nivel freático general y profundización de los niveles de bombeo, provocando el cambio en los patrones originales de flujo, así como el incremento de los

consumos de energía eléctrica en los equipos de bombeo; ii) reducción del caudal de la mayoría de los manantiales y desaparición de algunos; iii) disminución del caudal del río Verde, con daño al hábitat de la fauna y flora subacuática y ribereña; y iv) hundimientos y agrietamientos del suelo, con daños en las edificaciones y viviendas en las ciudades.

Los efectos anteriores, son más intensos en la porción sur de la llanura de Rioverde (valle de Rioverde), por lo que se prevé que en esta área se presente un mayor abatimiento y una disminución de las aguas de mejor calidad del acuífero superficial, y que se requiera aprovechar las aguas de menor calidad del acuífero profundo. Este escenario conduciría a una insuficiencia de agua de buena calidad para sustentar los actuales sistemas agrícolas, así como para abastecer la demanda del área conurbada, en constante crecimiento.

Para contribuir a resolver los problemas que se derivan del escenario que se ha planteado, es necesario establecer los fundamentos de una estrategia de uso racional del agua subterránea del área bajo estudio, que contemple las acciones siguientes: i) recopilar y procesar los datos de extracción y aprovechamiento del agua en el área agrícola, por ser el principal usuario del agua, para conocer la evolución del abatimiento del agua subterránea en la llanura; ii) definir el estado actual del aprovechamiento del agua en el área agrícola con el propósito de conocer los factores que influyen en la eficiencia de su uso en los sistemas agrícolas, para concentrar en ellos los esfuerzos de investigación e inversión.

Debido a que la extracción del agua subterránea con fines agrícolas es mucho mayor que el destinado al abastecimiento de las conurbaciones y comunidades, el presente trabajo se enfocará sólo al estudio en las áreas agrícolas.

Objetivos

Con base en lo anterior, el objetivo general del presente trabajo es plantear una estrategia de aprovechamiento racional del agua subterránea en la porción sur de la llanura de Rioverde, que contemple alternativas tecnológicas y administrativas, así como la optimización de los sistemas agrícolas.

Para alcanzar el objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- i) Recopilar y analizar la información histórica de los datos del conocimiento y aprovechamiento del agua subterránea en las áreas agrícolas pertenecientes a la llanura de Rioverde.
- ii) Reconocer y jerarquizar los factores que influyen en el aprovechamiento del agua subterránea para uso agrícola y sus implicaciones en el abatimiento del nivel freático en la porción sur de la llanura de Rioverde (valle de Rioverde).

Hipótesis

Para cumplir con los objetivos anteriores, se establecen las hipótesis siguientes:

- a. Los datos históricos del conocimiento y aprovechamiento permiten explicar la forma en que ha ocurrido el abatimiento del agua subterránea en el área de estudio.
- b. El análisis de los sistemas agrícolas y su respectiva infraestructura hidráulica permite reconocer y jerarquizar sus factores limitativos del uso racional del agua de riego.

Así, el presente trabajo de investigación quedó conformado por cuatro partes: en la primera, “Evolución reciente del aprovechamiento del agua subterránea de la llanura de Rioverde, San Luis Potosí, México”, analiza el conocimiento hidrogeológico y el aprovechamiento del agua subterránea de la llanura de Rioverde, dividida en dos valles (Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá) y Rioverde); este análisis permitió entender y explicar el nacimiento de las regiones agrícolas, así como la transformación de la tecnología de riego y de las áreas agrícolas, lo que ocasionó zonas de económicas de gran producción agrícola; sin embargo, ello también generó efectos ambientales negativos, como el descenso del nivel freático, la desaparición y reducción de manantiales, entre otros, particularmente en la porción sur de la llanura de Rioverde (valle de Rioverde). Lo anterior fundamentó la segunda parte, “Estado actual del aprovechamiento del agua subterránea en el valle de Rioverde, México”, en la cual, se caracteriza el aprovechamiento del agua freática que realizan los agricultores, reflejándose en diversas acciones tales como la implementación de medidores, adquisición de equipos electromecánicos, y sistemas de riego más eficientes, así como

la transformación de sus patrones de cultivo. Estas acciones provocaron un descenso acelerado en el nivel freático, asimismo diversos efectos ambientales negativos, como la desaparición de humedales y de manantiales. Estas consecuencias ambientales dieron lugar a la realización de la tercera parte, la “Discusión general” la cual contiene la propuesta de acciones de una estrategia de aprovechamiento racional del agua subterránea, específicas para la porción sur de la llanura de Rioverde.

2.1 Literatura citada

- Campos A., F. D., Análisis agro-climático preliminar del estado de San Luis Potosí, Agrociencia, Enero-marzo de 1993, Vol. 4, núm. 2, pp 19-43.
- Charcas S., H., E. Olivares S. y J. R. Aguirre R., Agua de riego en la región de Rioverde, San Luis Potosí, México. Ingeniería Hidráulica, 2002, Vol. XVII, núm. 4, pp 37-56.
- Charcas S., Proceso de conformación y caracterización actual de la región agrícola de Rioverde, San Luis Potosí, México, Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, 2002, 173 pp.
- CNA, Estudio geohidrológico de la zona de Cerritos y Guadalucazar, S.L.P.. San Luis Potosí, ROASA, contrato S/N, CNA. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal San Luis Potosí, México, D.F., 1983, (sp).
- CNA, Plan maestro para el mejoramiento de la eficiencia y desarrollo institucional del organismo operador de Rioverde, S.L.P., TACSA, contrato APA-IHUI-SLP-96-01, CNA. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal. San Luis Potosí, México, D.F., 1996. (sp.)
- de la Cruz, S y E. Peña., Method to improve water resources management in groundwater pumping areas and a case study. Water Resources Development, 1994, 10(3):329-337.
- García, E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen, México, 1988, 217 pp.

- Gómez, P.P. 1988. Riegos a presión aspersión goteo. Tercera edición. AEDOS. Barcelona, España. 329 pp.
- INEGI, San Luis Potosí. Resultados definitivos. VII. Censo agrícola-ganadero, tomo I, México, D.F., 1994, 505 pp.
- INEGI, *Anuario estadístico del estado de San Luis Potosí*, tomo I, México, D.F., 2006, 498 pp.
- INEGI, Síntesis geográfica del estado de San Luis Potosí, México, D.F., 1985, 186 pp.
- INEGI, Estudio hidrológico del Estado de San Luis Potosí, México, D.F., 2002, 136 pp.
- INEGI, Anuario estadístico del estado de San Luis Potosí, México, D.F., 2004, 744 pp.
- INEGI, Anuario estadístico del estado de San Luis Potosí, tomo I, México, D.F., 2006, 498 pp.
- Planer-Friedrich, B. Hydrogeological and hydrochemical investigations in the Rioverde basin, Mexico., Master Science Thesis. Technische Universität Bergakademie Freiberg. Germany, 1999, 145pp.
- Rendón P., L y C. Fuentes R., Eficiencias de riego (1997), en Manual para diseño de zonas de riego pequeñas, Fuentes R., C., H. Quiñónez P., L. Rendón P., F. R. Hernández S., R. Sánchez B., G. Magaña S., E. Peña P., J. Enciso M., J., F. Martínez S., M. Carrillo G., J.C. Herrera P., V. Angeles M., J. Castillo G., P. Martínez A., J. D. Replogle, A. J. Clemmens, B. De León M., V. M. Ruíz C., M. Iñiguez C. J. M. Ángeles H., M. Sánchez A., R. E. Artega T., I.M.T.A., México, 4-75pp.
- Román C., J. A., J. Ramírez H., J. Reyes, K. M. Bali y A. Pérez M., Modelación prospectiva de la demanda de agua en Baja California. Memorias del XII Congreso Nacional de Irrigación, Zacatecas, Zac., México, Mesa 2. Cultura, legislación y economía del agua: 2003, pp. 135-152.
- SARH, Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de San Ciró, San Luis Potosí, Geohidrología Mexicana, S.A., contrato GZA-79-42-ED, SARH. Subsecretaría de Infraestructura

Hidráulica. Dirección General de Programas de Infraestructura Hidráulica, Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, México, D.F., 1979. (sp.)

SEGAM, Plan de ordenamiento ecológico del valle de Rioverde y Cd. Fernández. Secretaria de Gestión Ambiental. San Luis Potosí. SLP. México, 2000, 232 pp.

SRH, Proyecto de zonas de riego. Segunda edición corregida y aumentada. Dirección de Proyectos de Grande Irrigación, Departamento de Canales. México, 1973, 662 pp.

2 Evolución reciente del aprovechamiento del agua subterránea de la llanura de Rioverde, San Luis Potosí, México

Resumen

El abatimiento del agua subterránea en la llanura de Rioverde conformada por los valles de Rioverde y Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá), se puede explicar a partir del análisis de los datos históricos del conocimiento y aprovechamiento del agua subterránea. Este artículo ordena y sintetiza a partir de estudios hidrológicos, de censos agrícolas y de población, las características más relevantes de la hidrogeología y del aprovechamiento del agua subterránea, en las áreas agrícolas irrigadas y en los asentamientos humanos conformados en conurbaciones y comunidades dispersas, pertenecientes a la llanura

de Rioverde. Los resultados muestran que el abatimiento provocado por la extracción del agua subterránea mediante pozos, trajo como consecuencia acciones tales como la desaparición y la reducción de caudales de manantiales; esta conexión hidrológica en la llanura de Rioverde, conformada por el Valle de Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá) y Valle de Rioverde se le puede considerar como un sistema hidrológico regional.

Palabras clave: Evolución, hidrogeología, llanura, agua subterránea, pequeños regadíos, Rioverde, San Luis Potosí.

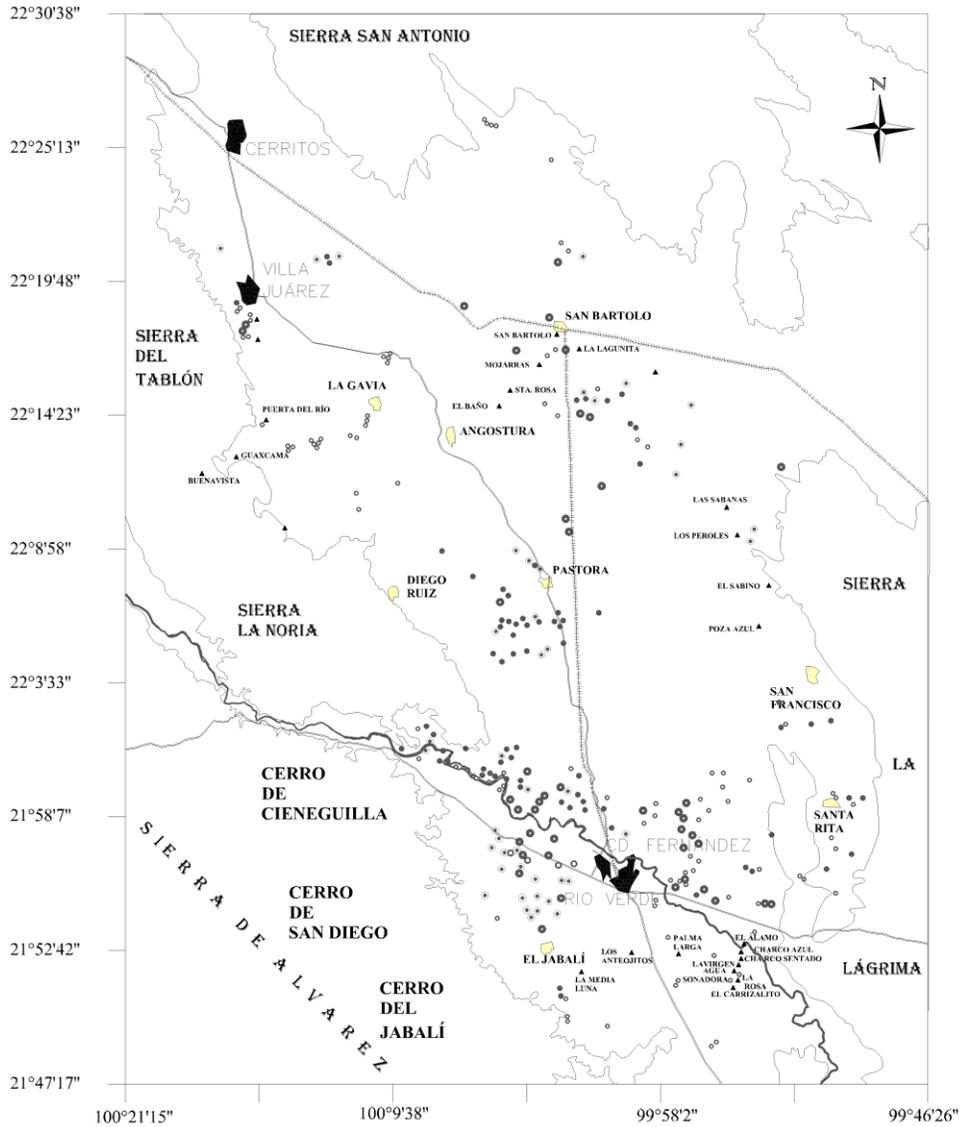
Abstract

The depletion of groundwater in the Rioverde plain formed by the Rioverde and Cerritos-Villa Juarez (Guaxcamá) valleys, can be explained from the analysis of historical data and the knowledge of groundwater use. This article orders and summarizes from hydrological studies and agricultural and population census, the most important characteristics of hydrogeology, and the groundwater exploitation, in irrigated agricultural areas and human settlements formed in conurbations and dispersed communities belonging to the Rioverde plain. The results show that the depletion caused by the extraction of groundwater through wells, resulted in the disappearance and reduced flows from springs; this hydrological connection in the Rioverde plain, can be considered as a regional water system, consisting of two subsystems Cerritos-Villa Juarez (Guaxcamá) Valley and Rioverde Valley.

Key words: Evolution, hydrogeology, Plain, groundwater, small irrigations, Rioverde, San Luis Potosí.

2.1 Introducción

La llanura de Rioverde se encuentra en la porción sureste del estado de San Luis Potosí, comprende porciones de los municipios de Rioverde, Ciudad Fernández, Villa Juárez y Cerritos; sus límites naturales son: noroeste, sierras La Noria y El Tablón; noreste, sierra Cordón de San Francisco; sureste, sierra La Lágrima; suroeste, sierras El Jabalí, San Diego y Cieneguilla (figura 1). El clima varía de seco semicálido al norte a semicálido subhúmedo en el sur (García, 1988; Campos, 1993; INEGI, 2006). Geográficamente, la llanura de Rioverde se divide en dos valles: i) Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá), en este valle, las aguas subterráneas están localizadas en dos acuíferos, el primero, *superficial*, en materiales sedimentarios calizos e ígneos, con descarga en 88 pozos, una extracción estimada de $5.70 \text{ millones de m}^3 \text{ año}^{-1}$, un regadío de 1334 ha y una población rural y urbana de 32000 habitantes (CNA, 1983; INEGI, 1994; INEGI, 2002; INEGI, 2006); el segundo, *profundo*, en rocas calizas de la formación El Doctor y yesos de la formación Guaxcamá, el agua se encuentra en fisuras y oquedades, la descarga es a través de 20 pozos profundos, la extracción se estima en $0.40 \text{ millones de m}^3 \text{ año}^{-1}$. En este valle brotan nueve manantiales, con un caudal total de $1.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, entre los que destaca Puerta del Río con un caudal de $1.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La condición hidrogeológica de los acuíferos superficial y profundo, corresponde a una extracción menor a la



SIMBOLOGÍA

- MANANTIAL ▲
- POZO PILOTO ●
- NORIA PILOTO ○
- POZO ●
- NORIA ○



SIMBOLOGÍA

- CABECERA MUNICIPAL ■
- COMUNIDAD □
- CARRETERA —
- FERROCARRIL |||||
- RIO VERDE ~~~~~

Figura 1. Pozos y manantiales de la llanura de Rioverde, San Luis Potosí, México

recarga. La calidad del agua subterránea para uso agrícola y doméstico es muy variable, pues ésta varía de salinidad media y sodicidad baja (C2S1), y potables, hasta aguas con salinidad alta a muy alta y sodicidad baja (C3S1 y C4S1), e impotables. La calidad del agua para uso agrícola, ha permitido la producción de maíz para grano intercalado con frijol en rotación con chile y jitomate; asimismo, la calidad del agua para uso doméstico, ha favorecido el inicio de una conurbación en los alrededores de las ciudades de Cerritos y Villa Juárez (SARH, 1979; INEGI, 1994).

ii) Rioverde, para este valle, las aguas subterráneas se encuentran en dos acuíferos, el primero, *superficial*, constituido por materiales ígneos y sedimentarios, la descarga es a través de 1271 pozos, la extracción se estima en 74 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$, un regadío de 7000 ha y una población urbana y rural de 120000 habitantes (Montañez, 1992; INEGI, 1994; INEGI, 2002); el segundo, *profundo*, en rocas calizas de la formación El Doctor, el agua se almacena en fisuras y oquedades, hasta ahora sólo se aprovecha con algunos pozos profundos. En este valle brotan 20 manantiales, con un caudal total de $8 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, entre los que destaca la Media Luna con un caudal de $4.0 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. La condición hidrogeológica del acuífero superficial se considera, extracción menor a la recarga y la del profundo, se desconoce (SARH, 1979; INEGI, 2002). La calidad del agua subterránea para uso agrícola y doméstico se caracteriza por el predominio de aguas con salinidad media y sodicidad

baja (C2S1), y potables. La abundancia y calidad de las aguas, ha favorecido la producción de cultivos anuales caracterizados por una rotación de maíz para elote con jitomate, chile, tomate y calabacita; cultivos perennes como naranja y mandarina; y forrajes como alfalfa, avena y sorgo. Asimismo, ha generado una gran conurbación alrededor de las ciudades de Rioverde y Ciudad Fernández (INEGI, 1994; Charcas *et al.*, 2002).

El aprovechamiento del agua subterránea de la llanura de Rioverde, está generando un desequilibrio generalizado entre las áreas de recarga y extracción, con los efectos siguientes: i) reducción del espesor saturado del acuífero con la consecuente cambio en los patrones de flujo; ii) profundización de los niveles de bombeo y descenso del nivel freático general, con el correspondiente incremento en el consumo de energía eléctrica; iii) reducción del caudal de la mayoría de los manantiales y desaparición de algunos; iv) disminución del caudal del río Verde, con daño al hábitat de la fauna y flora subacuática y ribereña; v) hundimientos y agrietamientos del terreno, con el respectivo deterioro en las edificaciones y viviendas.

Para resolver estos problemas, se requiere recopilar y analizar la información histórica de los datos del conocimiento y aprovechamiento del agua subterránea en las áreas agrícolas pertenecientes a la llanura de Rioverde, para lo cual se debe contemplar, entre otras acciones, la reconstrucción de la evolución en el conocimiento de la hidrogeología y el aprovechamiento del agua subterránea.

La hipótesis de que se partió fue: los datos históricos del conocimiento y aprovechamiento, permiten explicar la forma en que ha ocurrido el abatimiento del agua subterránea en el área de estudio.

2.2 Materiales y métodos

Para realizar el presente trabajo, se estableció la metodología siguiente.

i) Recopilación y análisis de los estudios que tratan sobre la geología, hidrología, hidrogeología y calidad de las aguas para uso agrícola y doméstico de la llanura de Rioverde, S.L.P., para lo cual se consultaron las bibliotecas y archivos siguientes: Casa de la Cultura de San Luis Potosí, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Comisión Nacional del Agua y Archivo histórico del Gobierno del Estado de San Luis Potosí. La información se ordenó cronológicamente en tres periodos, el primero de 1888 a 1902, el segundo de 1902 a 1950 y el tercero de 1950 a 2005; las aportaciones de los estudios de cada periodo se sintetizaron con base en las características más relevantes de los acuíferos superficial y profundo, así como de los manantiales, de cada valle, lo que reflejó el estado general del conocimiento del agua subterránea de la llanura de Rioverde. ii) Recopilación y análisis de estudios y censos de carácter agrícola y demográfico, e informes sobre los sistemas de abastecimiento de agua para la población urbana y rural de la llanura de Rioverde, S.L.P., para lo cual se consultaron las bibliotecas y archivos siguientes: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Casa de la Cultura de San Luis Potosí, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Comisión Nacional del Agua

y Archivo histórico del Gobierno del Estado de San Luis Potosí. La información se ordenó cronológicamente y geográficamente en cuatro periodos de 20 años; la información obtenida para cada periodo, se sintetizó para cada valle y el tipo de acuífero, lo que resultó en una comprensión del proceso histórico del aprovechamiento del agua subterránea de la llanura de Rioverde, S.L.P..

Con base en lo anterior, se definió el escenario del cual se debe partir para hacer un aprovechamiento sustentable del agua subterránea de la llanura de Rioverde, San Luis Potosí, México.

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Evolución de los estudios hidrogeológicos

2.3.1.1 Periodo de 1888 a 1902

El aprovechamiento del agua subterránea en la llanura de Rioverde, inicia alrededor de 1600, con la colonización de esta llanura, se desarrolló mediante la excavación de pozos a cielo abierto para el abasto doméstico y para abrevaderos. *En el lapso de 1888 a 1902*, al construirse la vía del Ferrocarril Central Mexicano, tramo Tampico-Aguascalientes y el ramal San Bartolo-Rioverde, se perforaron pozos profundos en cada una de las estaciones localizadas en la llanura de Rioverde. Las aguas que se alumbraron resultaron ser *ascendentes*, sobre todo en las estaciones Tablas, San Bartolo y Cerritos. El agua de dichos pozos se destinó al abastecimiento de las locomotoras de vapor, al mantenimiento de la estación y al uso doméstico de los empleados (Gálvez, *et al.*, 1941, Ordóñez, 1996).

2.3.1.2 Periodo 1902 a 1950

En 1902, se realizó el primer estudio hidrogeológico en la porción norte de la llanura de Rioverde, el objetivo de este trabajo fue localizar aguas artesianas o brotantes para el abastecimiento urbano y de riego en el valle de Cerritos. Los resultados fueron los siguientes: i) *acuífero profundo con aguas artesianas o brotantes*, probablemente se encuentra en el área comprendida entre la estación Cerritos del Ferrocarril Central Mexicano y la sierra El Rincón y los cerros La Rinconada y Las Pozas; ii) *acuífero profundo con aguas ascendentes*, se encuentra en todo el valle de Cerritos; en las perforaciones de las estaciones Tablas y San Bartolo las aguas se encontraban a profundidades menores a 70 m, en la perforación de la estación Tablas el agua ascendió hasta un metro por debajo de la superficie (Gálvez *et al.*, 1941; Ordóñez, 1996).

En 1909, se inició la exploración hidrogeológica del valle de Rioverde, el propósito fue localizar aguas artesianas potables para abastecer a las ciudades de Rioverde y Ciudad Fernández, asimismo para transformar en regadíos los terrenos localizados al sur del valle de Rioverde. Los resultados de dicho estudio, fueron los siguientes: i) *acuífero profundo con aguas artesianas*, probablemente se localizaban al oeste del valle de Rioverde, en el área comprendida entre las sierras de San Diego y La Noria y las localidades de Solano, San Rafael y Ojo de Agua de Solano; la profundidad a la que deberían hacerse las perforaciones sería alrededor de 300 m; ii) *aguas freáticas potables*, se localizaron en

el abanico aluvial Callejones (El Refugio), en terrenos de las haciendas San Diego y El Jabalí; la profundidad de la capa freática se encontraba entre 3.4 y 6.5 m; iii) *manantiales*, se ubicaban en toda la llanura de Rioverde, según su importancia y caudal, se distinguieron dos tipos: *caudalosos*, Ojo de Agua de Solano, Media Luna y Los Antejitos, ubicados al suroeste de la llanura de Rioverde, presentaban características similares en cuanto a temperatura y composición química, lo cual indicaba un origen profundo; *menos caudalosos*, Puenteitos, Arroyo Hondo, Las Higueras, San Antonio y Ojo de Agua de Ciudad Fernández, en la margen derecha del río Verde. En este estudio se realizaron los primeros análisis físico-químicos de las aguas de los manantiales siguientes: Media Luna, Ojo de Agua de Solano, Arroyo Hondo, Las Higueras y Ojo de Agua de Ciudad Fernández; asimismo, se analizaron las aguas de algunos pozos a cielo abierto, tales como Noria Municipal y San Balandrán. Según dichos análisis, todas las aguas de los manantiales resultaron impotables, mientras que las de las norias fueron potables. En la figura 2 se muestra la localización de las aguas brotantes y freáticas y de manantiales en el valle de Rioverde San Luis Potosí (Paredes, 1909).

En 1923, se realizó la primera investigación hidrológica para localizar aguas artesianas y aprovecharlas mediante avenamientos o pozos. Según esta investigación, la llanura de Rioverde podía dividirse en dos zonas: i) *Norte*, comprendía porciones de los municipios de Cerritos, Alaquines y Rioverde; la escorrentía superficial era escasa y sin

posibilidad de captarla mediante presas; el agua subterránea era abundante y con alta concentración de sales con posibilidad de aprovecharse para abrevaderos y en la producción de cosechas tolerantes a sales. Los pozos profundos localizados entre las ciudades de Cerritos y Villa Juárez presentaban aguas ascendentes *potables*. ii) *Sur*, en una porción del municipio de Rioverde, la escorrentía superficial era abundante y sin posibilidad de almacenarla mediante presas; el agua subterránea también era abundante y con baja concentración de sales, lo cual permite aprovecharla en el abastecimiento urbano y en la transformación de la superficie de secano en riego; Se afora el manantial de La Media Luna (por los Ingenieros Don Sebastián Reyes y Don Adolfo Barreiro en 1899) y se obtuvo un caudal de 5047 L s^{-1} . Asimismo, El *río Verde*, se constituye como el dren principal de los escurrimientos superficiales de las zonas norte y sur así como de los excedentes de los manantiales Media Luna y Los Anteojos, cabe mencionar que la corriente del río era perenne a partir de los excedentes del manantial Ojo de Agua de Solano (Obregón, 1923).

En 1937, se realizó el primer diagnóstico sobre las condiciones agrícolas e hidrológicas del valle de Rioverde, con el propósito de establecer las bases para el desarrollo agrícola en la región; los resultados relacionados con la hidrología subterránea y superficial, fueron los siguientes: Manantiales: i) *Media Luna*, presentaba un caudal de 7812 L s^{-1} , con el cual se regaba una superficie superior a las 3085 ha, que incluía los regadíos de Rioverde y Ciudad Fernández, y de los

ejidos El Refugio, El Jabalí y El Capulín. ii) *Ojo de Agua*, se regaba una superficie de 175 ha de los ejidos La Reforma y Adjuntas; los remanentes del regadío se vertían al río Verde, a partir de este manantial el cauce del río Verde era permanente. iii) *El Nacimiento*, su caudal se concentraba en la presa de San Diego; asimismo, la escorrentía subsuperficial fluía hacia el abanico superficial de Callejones (El Refugio), donde alumbraban en los pozos a cielo abierto de El Refugio. iv) *Los Peroles*, con el cual se regaba una superficie de 250 ha. Existían otros manantiales ubicados en las haciendas de La Angostura y La Boquilla. La calidad química de las aguas de estos manantiales se caracterizaba por su alto contenido de sulfato de calcio y carbonato de calcio, lo cual las hacía impotables, pero apropiadas para el riego (Acosta 1934).

Las aguas superficiales se almacenaban en dos presas, la primera San Diego, con capacidad para 2 millones de m³, y un regadío de 450 ha; la segunda El Jabalí, con capacidad para 1.5 millones de m³, y un regadío de 200 ha (Acosta, 1934).

En 1941, se efectuó el segundo estudio hidrogeológico en el valle de Cerritos y Rioverde, con el fin de ampliar los trabajos anteriores. Los resultados fueron la localización preliminar de pozos y manantiales, así como la medición del nivel freático y temperatura de las aguas. En el área Cerritos-Villa Juárez, el nivel freático se encontraba entre 6 y 27 m de profundidad a una temperatura de 20 a 23° C; en el área San Bartolo-Rioverde, el nivel freático variaba de 1 a 18 m de profundidad y

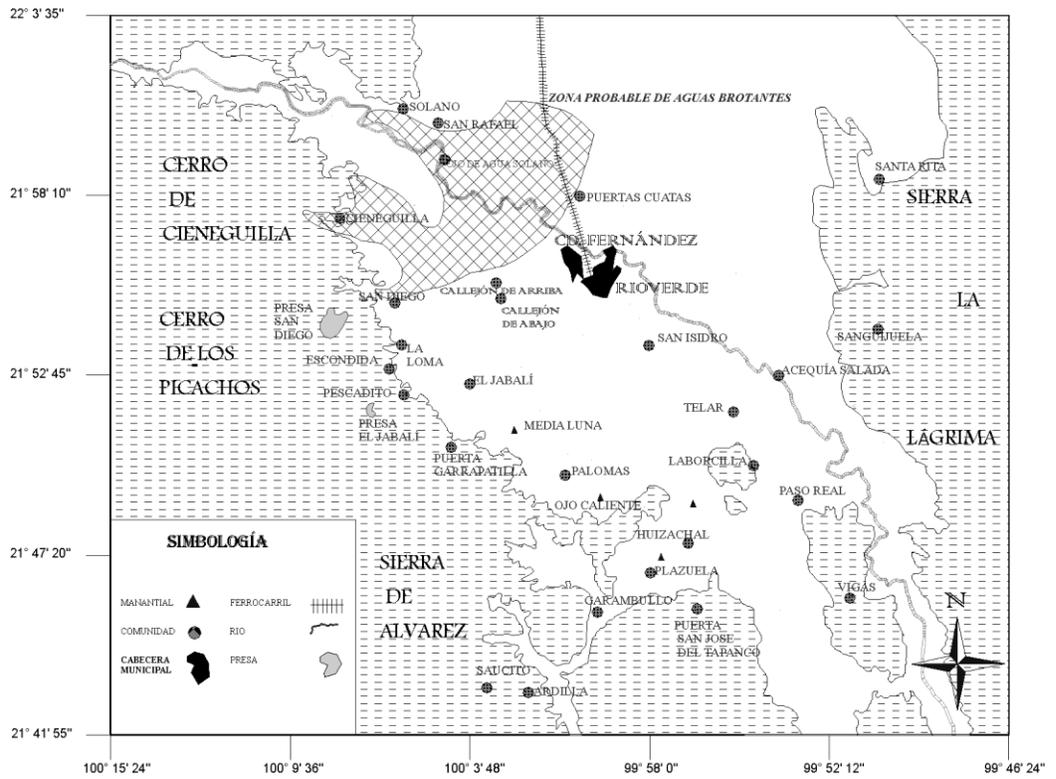


Figura 2. Zona probable de aguas brotantes del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México (adaptado de Paredes, 1909)

la temperatura de 21 a 25° C (Gálvez *et al.*, 1941).

2.3.1.3 Periodo 1950 a 2005

Alrededor de 1950, se inicia el aprovechamiento del agua subterránea mediante pozos con fines de riego. Generalmente, los pozos se excavaban a pico y pala (pozos a cielo abierto), a profundidades menores a los 15 metros.

En 1966, se realizó el segundo estudio hidrogeológico para el valle de Cerritos-Villa Juárez, el objetivo fue realizar un inventario detallado de los aprovechamientos de aguas subterráneas; el trabajo consistió en recorridos de campo y recolección de muestras de agua. Los resultados fueron: i) *Clasificación de los aprovechamientos*, 102 pozos a cielo abierto (norias), 6 pozos profundos, 20 manantiales, 3 galerías filtrantes (barrenaciones mineras), 2 escurrimientos superficiales y un estanque. ii) *Calidad geoquímica del agua*: a) temperatura, las aguas de pozos profundos y a cielo abierto eran frías, las de manantiales variaban de semi-termales a termales, con un gradiente de norte a sur; b) grupos geoquímicos, predominaban las aguas yesosas (sulfatadas cálcicas). iii) *Calidad química*, la conductividad eléctrica variaba de 340 a 11000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 25°C, la mayoría de las aguas eran impropias para el consumo humano, pero se utilizaban en los cultivos tolerantes a las sales. iv) *Hidrometría*: a) caudal, en los pozos profundos varió de 8 a 25 L s^{-1} mientras que en los pozos a cielo abierto fue de 1 a 30 L s^{-1} , en el caso de los manantiales variaron de 3 a 1815 L s^{-1} , destacando Puerta del Río con el valor máximo; b) niveles hidrostáticos, en los pozos a cielo

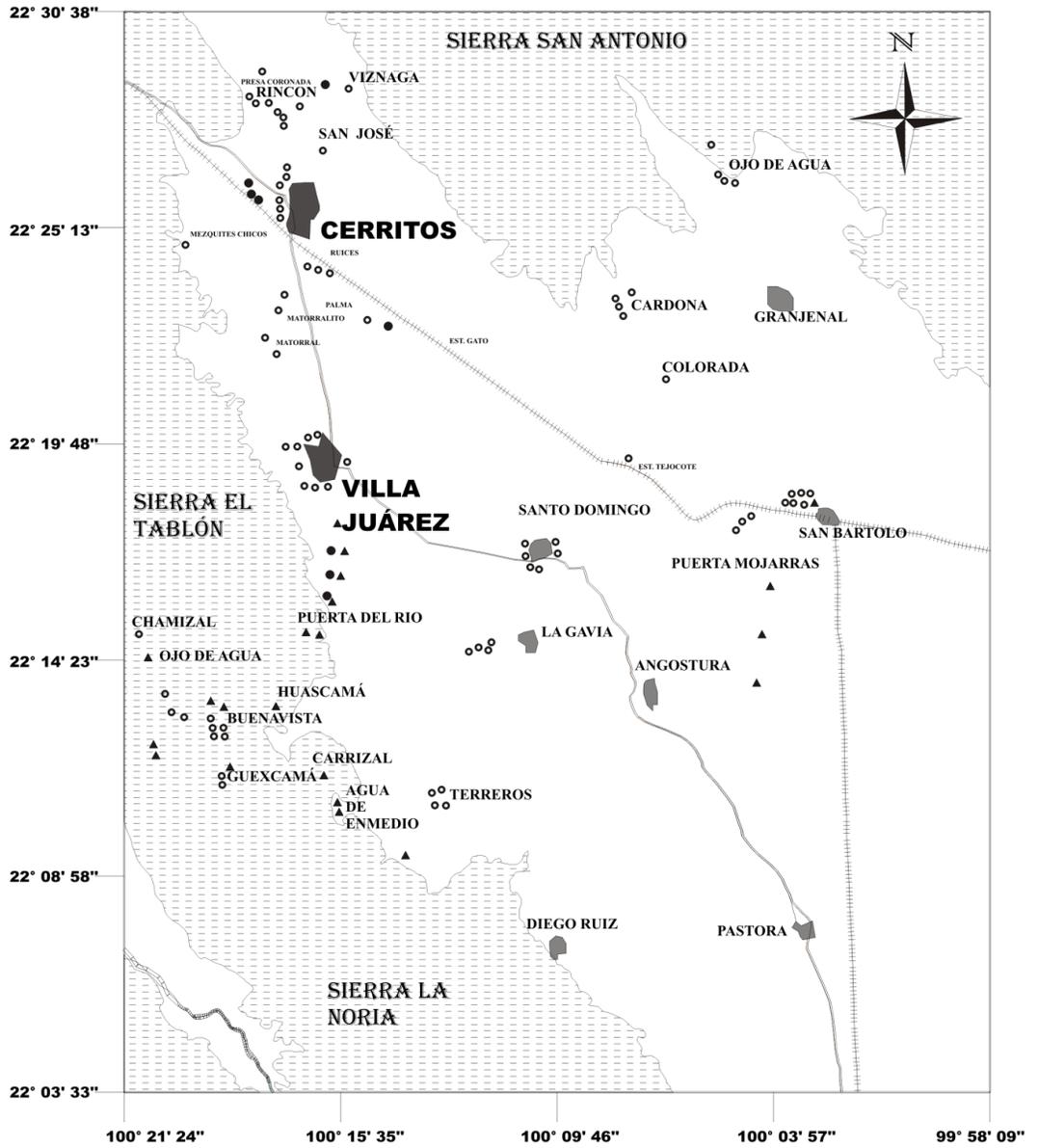
abierto el nivel freático varió de 10.5 a 51.50 m; para los pozos profundos el nivel piezométrico fue de 23 a 74.5 m; c) dirección del flujo: A) las aguas freáticas presentaban dos direcciones, la primera de noroeste a sureste y la segunda de sur a norte; B) las aguas profundas presentaban una dirección de sureste a noroeste; d) localización, los pozos se ubicaban dentro y en las cercanías de las poblaciones y de las estaciones del ferrocarril, lo cual indicaba que el aprovechamiento de las aguas subterráneas era solo para el consumo doméstico. Geográficamente, las aguas de mejor calidad se encuentran en el borde de las montañas, y las de menor calidad en la llanura. La figura 3 muestra la localización de los aprovechamientos del agua subterránea (Medina, 1966).

En el lapso de 1961 a 1984, se realizó el primer estudio hidroquímico de las aguas superficiales y subterráneas de los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández, el objetivo fue caracterizar las aguas de los aprovechamientos con base en su calidad química, de tal manera que se pudieran obtener índices de potabilidad, tales como sólidos disueltos totales (SDT), dureza y grupo geoquímico. Con base en los índices anteriores, las aguas se ubicaban geográficamente de la manera siguiente: i) Zona norte, predominan las aguas impotables con valores de SDT que varían de 1260 a 4500 mg L⁻¹, dureza de 1825 a 7450 mg L⁻¹, y grupo sulfatada cálcica; estas aguas además de ser impropias para el consumo humano, requieren del uso de jabones y detergentes especiales. ii) Zona sur, predominan las aguas potables con valores de

SDT que varían de 150 a 1020 mg L⁻¹, dureza de 90 a 1250 mg L⁻¹, predomina el grupo bicarbonatada cálcica y en menor proporción sulfatada cálcica; estas aguas presentan mayores posibilidades de uso para la población urbana y rural (Villalobos y Díaz de León, 1985). La distribución geográfica de las aguas según su potabilidad, se presenta en la figura 4.

En 1966, se realizó el primer censo de aprovechamientos subterráneos en todo el valle de Rioverde; el propósito fue caracterizar el uso (Doméstico, agrícola e industrial) y la tecnología de extracción del agua. Los resultados fueron los siguientes: *Pozos a cielo abierto (79.2%)*, con las características siguientes: profundidad hasta 36 m, diámetro del tubo de descarga de 3.8 a 25 cm, potencia del motor de 1.1 a 44.7 kW, caudal de 2 a 70 L s⁻¹; la superficie irrigada por estos pozos era de 3255 ha. *Pozos profundos (20.8 %)*, con las características siguientes: profundidad hasta 102 m, diámetro del tubo de descarga de 7.5 a 20 cm, potencia del motor de 3 a 55.9 kW, caudal de 8 a 60 L s⁻¹; la superficie irrigada mediante estas perforaciones era de 1093 ha. En general, todos los pozos extraen el agua del acuífero superficial mediante motores de combustión interna y bombas centrífugas asimismo en la zona sur se localizan la mayoría de los pozos (SRH, 1966).

En 1972, se realizó el segundo estudio hidrogeológico en el valle de Rioverde; el propósito era definir el área de recarga de las aguas subterráneas, las fronteras laterales e inferiores de los acuíferos, la



SIMBOLOGÍA

- MANANTIAL ▲
- POZO ●
- NORIA ○

Figura 3. Pozos y manantiales del valle de Cerritos-Villa Juárez, San Luis Potosí, México (adaptado de Medina, 1966)

hidrometría de las aguas freáticas y profundas y el funcionamiento de los acuíferos. Los resultados del estudio fueron los siguientes: Área de recarga, se identificaron dos superficies de acuerdo a la calidad geoquímica de las aguas: i) *Regional*, la cual corresponde a la sierra de Álvarez a elevaciones de 2500 m, en donde la precipitación se infiltra y circula en materiales calizos permeables y fracturados así como en rocas ígneas fracturadas; ii) *Local*, la cual corresponde a las sierras bajas de El jabalí, Cieneguilla, San Diego y El Tablón a elevaciones menores a los 1500 msnm, aquí la precipitación se infiltra y circula en materiales granulares y descarga en pozos profundos y a cielo abierto. *Fronteras de los acuíferos*, los materiales granulares están delimitados lateral y basalmente por rocas calizas de las formaciones El Doctor y Guaxcamá, y rocas volcánicas (riolitas) del terciario. El acuífero profundo está determinado por las formaciones anteriores y por las de Cárdenas y Tamasopo. Hidrometría, el agua que fluía y circulaba por las cavernas de las formaciones calizas descargaba a través de cinco grupos de manantiales, con los caudales siguientes: a) Ojo de Agua de Solano ($0.100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), Media Luna ($4.0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y Anteojitos ($0.250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$); b) La Virgen ($0.112 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), El Álamo ($0.065 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), Charco Azul ($0.189 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), Charco Sentado ($0.061 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), Agua Sonadora ($0.598 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), La Rosa ($0.051 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), Carrizalito ($0.068 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y Palma Larga ($1.197 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$); c) Los Peroles, Las Sabanas, Poza Azul y el Sabinito (sin aforo); d) San Bartolo ($0.020 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), La Lagunita, Santa Rosa, Mojarras y El Baño (sin aforo); y e) Puerta del Río ($1.0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), Guaxcamá y Carrizales (sin

aforo). Las aguas freáticas descargaban en el acuífero superficial mediante pozos a cielo abierto y profundos en dos zonas: *Norte*: el volumen de extracción se estimaba en 6 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$, los niveles freáticos se encontraban a profundidades de 5 a 30 m y la dirección del flujo era de noroeste a sureste y de noreste a suroeste con convergencia en el río Verde. *Sur*: el volumen de extracción anual se estimaba en 8 millones de m^3 , los niveles freáticos en el borde de la llanura presentaban una profundidad de 3 m, mientras que en la porción central llegaban hasta 10 m; las direcciones del flujo eran de oeste a este y de suroeste a noreste con convergencia en el río Verde (HIDROTEC, 1972; SARH, 1979).

En 1979, se realizó el tercer estudio hidrogeológico en la porción sur de la llanura de Rioverde; el objetivo fue conocer la dinámica de las aguas de los ocho manantiales ubicados en la margen derecha y su relación con los nacimientos Media Luna y Los Anteojitos; lo anterior con el propósito de reunir los caudales de los ocho manantiales y los remanentes de la Media Luna y Los Anteojitos para utilizarlos en la ampliación de los regadíos del sur y sureste de la llanura de Rioverde, así como la transformación en regadío del área de secano del valle de San Ciro de Acosta. Los resultados fueron los siguientes: *Aforo*, los caudales de los ocho manantiales eran: La Virgen ($0.112 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), El Álamo ($0.065 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), Charco Azul ($0.189 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), Charco Sentado ($0.061 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), Agua Sonadora ($0.598 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), La Rosa ($0.051 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), Carrizalito ($0.068 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y Palma Larga ($1.197 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) mientras que la Media Luna

($4.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y Los Antejitos ($0.15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). *Funcionamiento del acuífero:* los ocho manantiales, Media Luna y Los Antejitos compartían las mismas áreas de recarga, circulaban por las mismas formaciones calizas e ígneas y posiblemente estarían interconectados, asimismo de acuerdo a los análisis isotópicos, la edad de las aguas de los nacimientos variaban de 20 a 30 años (SARH, 1979).

En 1982, se realizó el cuarto estudio hidrogeológico para el valle de Rioverde, el objetivo fue definir la extracción y funcionamiento del acuífero superficial; el propósito del trabajo fue complementar los estudios anteriores para fundamentar la ampliación de los regadíos de las distintas áreas de bombeo de pozos. Los resultados indicaban lo siguiente: *Hidrometría: Zona norte*, los niveles freáticos en el borde de la llanura eran de 4 m a excepción del área al oeste con 30 m, mientras que en la porción central de 5 m; la dirección del flujo se uniformiza de noroeste a sureste y la extracción asciende a 16.10 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$. *Zona sur*, los niveles freáticos en el borde de la llanura eran de 6 m, mientras que en la porción central de 12 m; las dos direcciones de flujo se uniformizan en una nueva de suroeste a noreste y la extracción se incrementa a 16.1 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$; asimismo se inició el monitoreo hidrométrico del acuífero con aproximadamente 80 pozos (a cielo abierto y profundos) pilotos (Proyesco, 1980; Montañez, 1992).

En 1983, se realizó el tercer estudio hidrogeológico para el valle de Cerritos-Villa Juárez, el objetivo fue realizar un censo y la hidrometría de pozos y manantiales, y así definir las áreas favorables para su

aprovechamiento agrícola y doméstico. Los resultados fueron los siguientes: i) *Clasificación de los aprovechamientos*, 49 pozos a cielo abierto y profundos (alrededor de 15 pozos están en operación) y 3 manantiales. ii) *Hidrometría*, a) *caudal*, en los pozos profundos varió de 25 a 100 L s⁻¹; b) *niveles hidrostáticos*, en los pozos a cielo abierto el nivel freático varió de 4 a 25 m, para los pozos profundos el nivel piezométrico fue de 13 a 100 m; c) *dirección del flujo*, las aguas profundas presentan una dirección de sureste a noroeste; d) *extracción*, del acuífero superficial 5.70 millones de m³ año⁻¹, del profundo 0.40. iii) *Zonificación por uso y calidad del agua*: a) *agrícola*, se distinguen tres clases, y se localizan en el valle de la manera siguiente: C2S1, al norte y noroeste; C3S1, al suroeste; C4S1 al centro; b) *doméstico*, se distinguen dos clases aguas: *potables*, localizadas al norte y oeste del valle; *impotables* ubicadas al centro y suroeste del valle. En general, la zona con aguas de mejor calidad para uso agrícola y doméstico se localiza al noroeste y oeste del valle, en el pie de monte de la sierra de El Tablón (CNA, 1983).

En 1999, se realizó el quinto estudio hidrogeológico en el valle de Rioverde, el objetivo fue reinterpretar la información previa sobre la geología e hidrogeología del valle de Rioverde, así como la obtención de nuevos datos que incluían nuevos elementos químicos (Ba, Sr, Ni, Cr, Li, B, y F). Los resultados fueron los siguientes: Clasificación de muestras de aguas de aprovechamientos, con estadística multivariable (análisis cluster) se identificaron cuatro grupos diferentes: i) *Pozos de El*

Refugio, para uso doméstico y agrícola, las aguas pertenecían al grupo geoquímico bicarbonatadas cálcicas y a la clase C2S1; ii) *Pozos de El Refugio*, uso doméstico y agrícola, correspondientes al grupo geoquímico sulfatadas cálcicas y a la clase C3S1; iii) *Manantiales cársticos*, uso agrícola y recreativo, pertenecientes al grupo geoquímico sulfatadas cálcicas y clase C3S1, con altas temperaturas y con exceso de minerales; y iv) *Pozos de Pastora*, para uso agrícola, pertenecientes al grupo geoquímico sulfatadas cálcicas y clase C4S1. Asimismo, se muestra la relación que existe entre los acuíferos superficial y profundo con la calidad de las aguas (Planner, 1999).

En 2002, se realizó un estudio de recopilación y clasificación de los datos de las muestras analizadas en los laboratorios del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas y del Distrito de Desarrollo Rural 130, de pozos y manantiales del valle de Rioverde. El objetivo fue caracterizar e interpretar la calidad química de las aguas de pozos y manantiales, de tal manera que se pudieran definir sus posibilidades de uso agrícola. Los resultados fueron los siguientes: i) *Zona norte*, las aguas de los pozos y manantiales corresponden a las clases C4S1 y C5S1; estas aguas aplicadas en suelos someros, con mal drenaje y alto contenido de sales, permiten obtener bajos rendimientos en la mayoría de los cultivos. ii) *Zona sur*, las aguas de los pozos y manantiales pertenecen a las clases C1S1, C2S1 y C3S1; su uso en suelos profundos con buen drenaje y bajo contenido de sales producen una gran diversidad de cultivos y obtener altos rendimientos. Asimismo, en

la región de Rioverde la calidad química del agua para riego se puede establecer sólo con la determinación de su conductividad eléctrica (CE) y su potencial hidrógeno (pH). La distribución geográfica de las clases de agua de pozos y manantiales se muestra en la figura 5 (Charcas *et al.*, 2002).

En 2003, se realizó una segunda evaluación del aprovechamiento del agua subterránea y su impacto en las áreas agrícolas en el valle de Rioverde. Los resultados son: i) *Zona norte*, el agua de peor calidad (C4), se utilizaba en el 31 % de la superficie de riego por bombeo en cultivos forrajeros; ii) *Zona sur*, las clases de agua de mejor calidad (C2 y C3) eran aprovechadas para el regadío del 68 % de la superficie dedicada a hortalizas y cítricos; el 1 % de la superficie era regada con agua de excelente calidad (C1) en hortalizas y cítricos. El estudio propone diversas acciones para hacer un uso más eficiente del agua, tales como la instalación de medidores en los pozos, programas de capacitación y apoyo para el mejoramiento de la productividad, conservación del agua y la construcción de sistemas de conducción y aplicación más eficientes (Ballín, 2003).

En 2005, se realizó un estudio hidrogeológico e hidrométrico del acuífero superficial Rioverde-Ciudad Fernández (El Refugio); el propósito fue definir el funcionamiento de dicho acuífero y establecer las áreas de recarga locales para planear obras de inducción de recarga artificial. Los resultados fueron los siguientes: i) *Hidrometría*, el nivel freático en el borde de la llanura era de 6.35 m, mientras que en la

porción central de 37.7 m; la dirección del flujo era de suroeste a noreste; la extracción total ascendió a 74 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$; ii) *zonas de recarga*, están situadas en el pie de monte de las sierras de Cieneguilla, San Diego y El Jabalí, en elevaciones menores a los 1450 msnm; *obras de recarga*, a corto plazo se propone una presa de gaviones y dos de mampostería en el arroyo El Nacimiento; a mediano plazo, se proyectan dos pozos de recarga y extracción en los arroyos La Loma y Grande, asimismo, algunas presas de gaviones; a largo plazo, se proyectan la calibración de un modelo de simulación hidrogeológica y la construcción de pozos de recarga para analizar el comportamiento del acuífero. En cada etapa se consideran estudios de evaluación del impacto de las obras por realizar (Candelaria *et al.*, 2005).

Con base en la información anterior, el estado del conocimiento sobre el agua subterránea en la llanura de Rioverde, se puede sintetizar de la manera siguiente:

i) Valle de Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá)

Acuífero superficial: Medio físico, conformado por materiales granulares de origen calizo, con un espesor alrededor de 70 m, las fronteras laterales y basales son rocas de las formaciones El Doctor y Guaxcamá. *Hidrometría*, el nivel freático se encuentra entre 10 y 51 m, la dirección de flujo es de noroeste a sureste, y el caudal de los pozos es de 1.5 a 15 L s^{-1} . *Geoquímica*, presencia del grupo sulfatada cálcica. *Calidad del agua para uso agrícola y doméstico*, clases C3S1 y C4S1, con predominio de la C3S1 y aguas principalmente impotables.

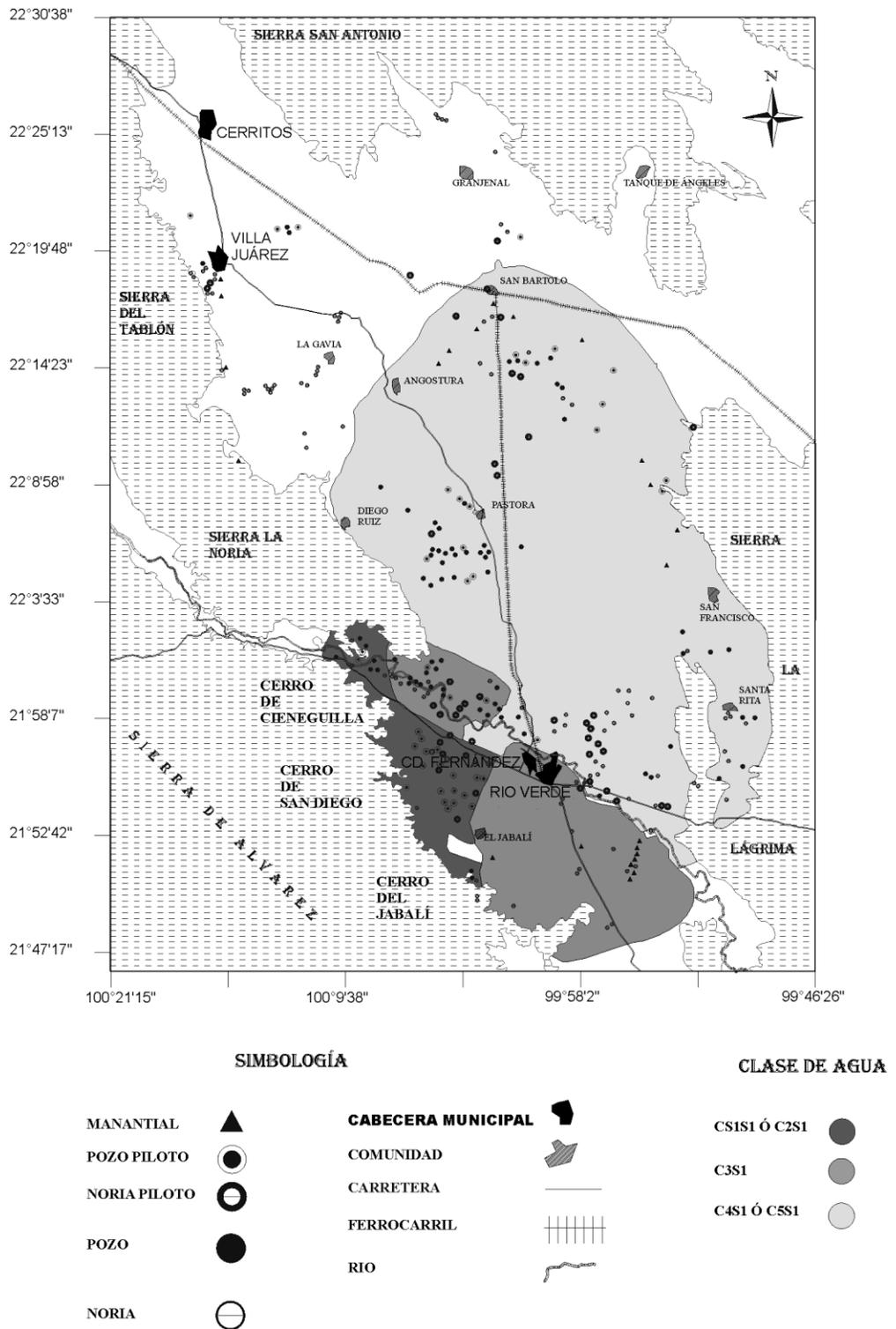


Figura 5. Distribución de las clases de agua de pozos y manantiales del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México (Charcas *et al.*, 2002)

Dinámica del acuífero, la extracción se estima en 5.70 millones de m³ año⁻¹, mediante 49 pozos; la recarga se realiza principalmente en el pie de monte de las sierras bajas de El Tablón y Guadalcázar. *Monitoreo*, los pozos pilotos (a cielo abierto y profundos) ascienden a 6 y se encuentran distribuidos al oeste del valle.

Acuífero profundo: Medio físico, conformado por rocas calizas de las formaciones El Doctor y Guaxcamá, las fronteras laterales son basaltos y rocas de la formación Guaxcamá. Hidrometría, el nivel piezométrico se ubica a profundidades de 13 a 100 m, la dirección de flujo es de sureste a noroeste, y el caudal de los pozos de 25 a 100 L s⁻¹. Geoquímica, presencia de los grupos sulfatada cálcica y bicarbonatada cálcicas, con predominio del primer grupo. Calidad del agua para uso agrícola y doméstico, clases C2S1, C3S1 y C4S1, con predominio de la C3S1 y principalmente aguas impotables y en menor proporción potables. *Dinámica del acuífero*, la extracción se estima en 0.40 millones de m³ año⁻¹, mediante 2 pozos profundos; la recarga se realiza en las partes altas de las sierras El Tablón y Guadalcázar.

Manantiales: se localizan al suroeste del valle, y se distinguen dos grupos de acuerdo con su calidad química del agua: i) Puerta del Río, El Baño (El Sabino), Ojo de León y Catarinas; ii) Buenavista, El Carrizalillo, El Carrizal, La Cueva, El Plátano, Agua de en Medio y Agua Postretera. En conjunto suman un caudal aproximado de 1500 L s⁻¹, destacando Puerta del Río con alrededor de 1000 L s⁻¹ y el Sabino y Ojo de León

con 23 y 28 L s⁻¹, el resto de los manantiales tienen caudales de 1 a 2 L s⁻¹.

ii) Valle de Rioverde

Zona Norte:

Acuífero superficial: Medio físico, conformado por sedimentos de las formaciones El Doctor y Guaxcamá, y rocas ígneas del terciario (riolitas) y cuaternario (basaltos), con un espesor hasta 330 m, las fronteras laterales y basales son rocas de las formaciones anteriores.

Hidrometría, el nivel freático se encuentra entre 4 y 30 m, la dirección del flujo es de noroeste a sureste convergiendo en el río Verde, y el caudal de los pozos es de 1.4 a 18 L s⁻¹. *Geoquímica*, presencia del grupo sulfatada cálcica. *Calidad del agua para uso agrícola y doméstico*, clases C4S1 y C5S1, y aguas impotables. *Dinámica del acuífero*, la extracción se estima en 42 millones de m³ año⁻¹, mediante 230 pozos; la recarga estimada en 30 millones de m³ año⁻¹, y se localiza en el pie de monte de las sierras circundantes (La Noria, El Tablón, Guadalcázar y San Francisco); lo cual indica que el acuífero está en desequilibrio. *Monitoreo*, los pozos pilotos ascienden a 20 y se encuentran distribuidos sistemáticamente en toda la zona.

Acuífero Profundo: Medio físico, conformado por rocas calizas de las formaciones El Doctor y Guaxcamá, las fronteras laterales, son rocas calizas de las formaciones Guaxcamá y Cárdenas. *Hidrometría*, el nivel piezométrico se encuentra a profundidades menores a los 70 m. *Geoquímica*, presencia del grupo sulfatada cálcica. *Calidad del agua*

para uso agrícola y doméstico, clases C4S1 y C5S1, y principalmente aguas impotables. *Dinámica del acuífero*, la recarga se realiza en las partes altas de las sierras de El Tablón, Guadalcázar y San Francisco.

Manantiales: de acuerdo a su ubicación y calidad química del agua se localizan dos grupos: i) *norte*, San Bartolo, La Lagunita, Mojarras, Santa Rosa y El Baño; ii) *noreste*, Los Peroles, Las Sabanas, El Sabino y Poza Azul.

Zona Sur:

Acuífero superficial: Medio físico, conformado por materiales granulares de origen volcánico (riolitas), con un espesor alrededor de los 184 m, fronteras laterales y basales de rocas volcánicas y calizas de la formación El Doctor. *Hidrometría*, el nivel freático se encontraba entre 20 y 40 m, la dirección del flujo es de suroeste a noreste convergiendo al río Verde y el caudal de los pozos es de 3 a 30 L s⁻¹. *Geoquímica*, presencia de los grupos bicarbonatada cálcica y sulfatada cálcica, con predominio del primero. *Calidad del agua para uso agrícola y doméstico*, clases C1S1, C2S1 y C3S1, con predominio de la C2S1 y principalmente aguas potables. *Dinámica del acuífero*, la extracción se estima en 37.8 millones de m³ año⁻¹, mediante 304 pozos; la recarga se considera en 34 millones de m³ año⁻¹, se realiza a pie de monte en las sierras circundantes (El Jabalí, San Diego y Cieneguilla) al valle; lo cual indica que el acuífero está en desequilibrio. *Monitoreo*, los pozos pilotos ascienden a 80 y se encuentran distribuidos al oeste del valle.

Acuífero profundo: Medio físico, conformado por las rocas calizas de las formaciones El Doctor y Guaxcamá; fronteras laterales, rocas ígneas y calizas de las formaciones El Doctor y Guaxcamá. *Hidrometría*, nivel piezométrico y dirección del flujo, se desconocen; el caudal de los pozos es alrededor de los 100 L s⁻¹. *Geoquímica*, presencia del grupo sulfatada cálcica. *Calidad del agua para uso agrícola y doméstico*, clases C3S1 y C4S1 e impotables. *Dinámica del acuífero*, se desconoce.

Manantiales:

Zona sur: geográficamente se distinguen dos grupos, con los caudales siguientes: i) suroeste, Media Luna (4.7 m³ s⁻¹) y Los Anteojitos (0.200 m³ s⁻¹); ii) margen derecha del río Verde, Palma Larga (1.197 m³ s⁻¹), Carrizalito (0.068 m³ s⁻¹), La Rosa (0.051 m³ s⁻¹), Agua Sonadora (0.598 m³ s⁻¹), Charco Sentado (0.061 m³ s⁻¹), Charco Azul (0.189 m³ s⁻¹), El Álamo (0.065 m³ s⁻¹) y La Virgen (0.112 m³ s⁻¹).

2.3.2 Aprovechamiento del agua subterránea

2.3.2.1 Valle de Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá)

Antes de 1930, el aprovechamiento del agua subterránea se realizaba de la siguiente manera. i) *Acuífero superficial*, existían perforaciones que abastecían a las ciudades de Cerritos y Villa Juárez, así como a pequeñas localidades; sus caudales eran alrededor de 3 L s⁻¹. ii) *Acuífero profundo*, había algunos pozos que abastecían a las estaciones del Ferrocarril Central Mexicano (DGE, 1937; Ordóñez, 1996).

En 1950, ya se había iniciado la utilización del agua subterránea por bombeo con fines agrícolas, además de los regadíos existentes por manantiales, resultando con las características siguientes. i) *Acuífero superficial*, mediante 25 pozos, con caudales de 3 a 25 L s⁻¹; además, había perforaciones alrededor de las ciudades de Cerritos y Villa Juárez y en las pequeñas poblaciones, sus caudales eran alrededor de 3 L s⁻¹. ii) *Manantiales*, se señalan seis, se aprovechan para la producción de cosechas (Ojo de León, Sabinito, San Tiburcio, Guaxcamá, Buenavista y Carrizalito). El área agrícola irrigada con pozos y manantiales era de 566 ha, se sembraba principalmente maíz intercalado con frijol (Gálvez *et al.*, 1941; DGE, 1957).

En 1970, continúa el uso del agua subterránea por medio de pozos y manantiales de la siguiente forma. i) *Acuífero superficial*, 42 pozos para uso agrícola, con caudales menores que 25 L s⁻¹, además, había perforaciones alrededor de las ciudades de Cerritos y Villa Juárez, y en las rancherías, sus caudales eran alrededor de 3 L s⁻¹. ii) *Manantiales*, se señalan nueve, los cuales se aprovechaban para la producción de cosechas y abrevaderos (Ojo de León, Sabino, Catarinas, Puerta del Río, Guascamá, Buenavista, El Carrizal, Agua de Enmedio, Agua Postrera). El área agrícola irrigada por pozos y los nacimientos Ojo de León y El Sabino era de 792 ha; se sembraba principalmente maíz, maíz intercalado con frijol y algodón (Medina, 1966; DGE, 1975).

En 1990, se intensifica el aprovechamiento del acuífero superficial y profundo y disminuye en los manantiales. i) *Acuífero superficial y*

profundo, existían alrededor de 61 pozos para uso agrícola, con caudales de 25 a 100 L s⁻¹. ii) *Manantiales*, en conjunto reúnen un caudal de 1500 L s⁻¹. El área agrícola irrigada mediante pozos y manantiales era de 1334 ha, se sembraba maíz intercalado con frijol, chile y jitomate (CNA, 1983; INEGI, 1994).

2.3.2.2 Valle de Rioverde

Zona norte

Antes de 1950, las aguas freáticas se extraían mediante pozos para uso doméstico, los manantiales se utilizaban para el suministro de regadíos, de la siguiente forma. i) *Acuífero superficial*, existían perforaciones que abastecían a las pequeñas poblaciones, tales como El Sabino, La Muralla, San Francisco, San Bartolo, Angostura, Progreso y Pastora. ii) *Acuífero profundo*, había algunos pozos que suministraban a las estaciones del Ferrocarril Central Mexicano (San Bartolo, Tablas, El Cirio y Pastora). iii) *Manantiales*, se señalan Los Peroles (500 L s⁻¹) San Bartolo (422 L s⁻¹) y El Sabinito; San Bartolo y Los Peroles regaban una superficie de 400 y 350 ha, respectivamente. La producción de cosechas consistía en maíz, caña de azúcar y algodón (Anónimo, 1906; Acosta, 1934; Gálvez *et al.*, 1941; Ordóñez, 1996).

En 1970, ya se había iniciado el uso del agua subterránea mediante pozos con fines agrícolas, conjuntamente con los regadíos de manantiales, de la siguiente forma:

i) *Acuífero superficial*, había alrededor de 90 pozos (81% a cielo abierto), con profundidad máxima de 102 m; la extracción del agua se

realizaba con motores de combustión interna de 1.1 a 56 kW y bombas centrífugas; los caudales eran de 2 a 70 L s⁻¹. ii) *Manantiales*, se identifican dos grupos: A) Los Peroles, Las Sabanas, Poza Azul y El Sabino, con un caudal total estimado de alrededor de 645 L s⁻¹, para un regadío de 500 ha; B) El Baño, Santa Rosa, Mojarras, La Lagunita y San Bartolo, con un caudal total de alrededor de 200 L s⁻¹, para abastecer tres pequeños regadíos. El área agrícola irrigada por pozos y manantiales era de 2666 ha, se sembraba principalmente maíz, frijol y algodón (SRH, 1966; DGE, 1975).

En 1990, se intensifica la utilización del agua subterránea mediante pozos. i) *Acuífero superficial*, se incrementa el número de pozos de 90 a 129, perforados a una profundidad máxima de 256 m, la extracción se realizaba con motores de combustión interna y eléctricos, con caudales de 25 a 81 L s⁻¹. El área agrícola irrigada total se incrementó a 2956 ha, se sembraba principalmente maíz, sorgo y alfalfa (INEGI, 1994; Información proporcionada por el Distrito de Riego 130 y la Comisión Nacional del Agua).

Zona sur

Antes de 1950, las condiciones generales del aprovechamiento de las aguas freáticas y de los manantiales tenían las características generales siguientes: i) *Acuífero superficial*, existían pozos a cielo abierto que abastecían a las ciudades de Rioverde y Ciudad Fernández, así como a pequeñas localidades, sus caudales eran alrededor de 15 L s⁻¹. ii) *Manantiales*, se señalan cinco manantiales, con los caudales y

regadíos siguientes: Ojo de Agua de Solano con 200 L s^{-1} y 175 ha. Media Luna: A) *Rioverde*, 1846 L s^{-1} ; B) *Ciudad Fernández*, 903 L s^{-1} ; C) Ejidos y Pequeñas Propiedades del sur y sureste, 647.5 L s^{-1} ; D) El Jabalí, 1553 L s^{-1} . Los Anteojos, 200 L s^{-1} . Palma Larga, 1200 L s^{-1} (Paredes, 1909; Acosta, 1934; DGE, 1937; Gálvez *et al.*, 1941; DGE, 1957; SARH, 1979).

En 1970, el agua freática se extraía mediante pozos para el abastecimiento de las ciudades y pequeñas localidades, asimismo para regadíos ubicados en la margen derecha del río Verde y al suroeste del valle de Rioverde. i) *Acuífero superficial*, las ciudades de Rioverde y Ciudad Fernández se suministraban mediante dos pozos profundos con un caudal total de 32 L s^{-1} ; la población urbana y rural abastecida era de 32000 habitantes. Los regadíos se abastecían con 115 pozos (77 % a cielo abierto), con profundidad máxima de 36 m, la extracción del agua se realizaba con motores de combustión interna de 2.2 a 20.9 kW y bombas centrífugas, con un caudal de 7 a 60 L s^{-1} , el área agrícola irrigada era de 2300 ha, y la producción de cosechas consistía en maíz para grano, chile y jitomate. ii) *Manantiales*, el área irrigada tradicional se conformaba por los siguientes regadíos: A) Rioverde y Ciudad Fernández, los cuales eran abastecidos por las acequias Rioverde y Villana; B) El Capulín, con las acequias Capulín y Palos; C) Ejidos y pequeñas propiedades del sur y sureste, abastecidos con la acequia San José (SRH, 1966; DGE, 1975).

En 1990, se incrementó el número de pozos para uso urbano y agrícola, y los regadíos tradicionales conformaron el Distrito de Riego 049. i) *Acuífero superficial*, las ciudades de Rioverde y Ciudad Fernández se abastecían de ocho pozos profundos, con un caudal total de 156 L s^{-1} ; la población urbana y rural abastecida era de 58000 habitantes. Los regadíos ubicados en la margen derecha del río Verde y al suroeste del valle de Rioverde, eran proveídos por 179 pozos (78% profundos), con profundidad máxima de 75 m, en donde la extracción se realizaba con motores de combustión interna y eléctricos de 4.5 a 63.4 kW, bombas de turbina, y un caudal de 3 a 36 L s^{-1} . La superficie irrigada se incrementó a 3850 ha; la producción de cosechas se diversificó y se realizó en dos ciclos: invierno-primavera, maíz para elote, chile, jitomate y tomate; verano-otoño, maíz para elote. En ambos ciclos, las variedades eran mejoradas, con mayor requerimiento de agua, asimismo se cultivaban naranja valenciana, mandarina, alfalfa y sorgo. Además, se amplió la red eléctrica, lo cual trajo como resultado una mayor eficiencia en los equipos de bombeo que incrementó en gran medida la extracción en el acuífero. ii) *Manantiales*, Media Luna, Los Anteojitos, ocho manantiales de la margen derecha del río Verde y los remanentes de los regadíos conformaron el Distrito de Riego 049, de la manera siguiente: superficie atendida, 4210 ha, superficie dominada, 7583 ha y superficie decretada, 14000 ha; Unidades: i) *Media Luna*, con un caudal promedio de 4691 L s^{-1} , distribuido en cuatro canales: Principal Media Luna, 2445 L s^{-1} ; Capulín, 457 L s^{-1} ; Potrero de Palos,

262 L s⁻¹; San José, 872 L s⁻¹; y Dren de Descarga, 655 L s⁻¹. Asimismo, se construyó una red de drenes, cinco en el área tradicional, y tres en la ampliada; con esta unidad se intentaba incorporar 1416 ha localizadas al norte de la ciudad de Rioverde. ii) *Acequia Salada*, se construyó una estación de bombeo y el canal San Ciro, el cual sería alimentado con los remanentes del regadío de Rioverde y Ciudad Fernández y con las aguas de los ocho manantiales de la margen derecha del río Verde; con esta unidad se intentaba transformar 2095 ha de secano a riego. Por problemas de derechos de aguas de los usuarios aguas abajo del área tradicional de riego, así como por insuficiencia de la misma, el nuevo proyecto de riego quedó parcialmente abandonado en ambas unidades (SARH, 1979; Montañéz, 1992; información proporcionada por el Distrito de Riego 130 y la Comisión Nacional del Agua).

Con el establecimiento del Distrito de Riego 049 se tuvieron los efectos siguientes: i) desecación del humedal y ampliación del área agrícola, ii) desaparición de los cuerpos de agua permanentes del humedal: laguna Tlacotes y Charco La Pala, iii) desaparición de los manantiales Palma Larga, El Carrizalito y La Rosa, asimismo, la reducción del caudal y la posibilidad de derivación de Los Antejitos, y iv) se incrementó la profundidad del nivel freático en el área de bombeo de El Refugio.

Actualmente, se intensifica la extracción del agua freática, inicia el aprovechamiento del acuífero profundo, y disminuyeron los caudales de los manantiales de la margen derecha del río Verde. i) *Acuífero superficial*, el número de pozos se incrementa de 179 a 742 pozos, la

mayoría profundos, con motores eléctricos de 3.7 a 93.2 kW, bombas de turbina y sumergibles y caudal de 3 a 100 L s⁻¹. ii) *Acuífero profundo*, pozos con caudales de alrededor de 100 L s⁻¹. Los pozos se aprovechan de la manera siguiente: agrícolas, 617; urbanos, 68; inactivos, 49. Los pozos agrícolas riegan 4095 ha, los cultivos anuales de invierno-primavera son chile, jitomate, tomate y calabacita y de verano-otoño es principalmente el maíz para elote, con predominio de variedades mejoradas; persisten los frutales (naranja y mandarina) y forrajes (alfalfa y sorgo); la aplicación del agua y nutrientes es mediante riego por goteo a maíz y hortalizas, y microaspersión a frutales, y por gravedad a frutales y maíz en surcos y amelgas. Los pozos para uso doméstico, abastecen a una población urbana y rural de 68000 habitantes. iii) *Manantiales*, Agua Sonadora, El Sabinito, Charco Sentado, Charco Azul, El Álamo y La Virgen redujeron drásticamente sus caudales (INEGI, 2002; Ballín, 2003; CNA, 2004; INEGI 2006).

Además, el humedal se transforma en regadío y en viviendas campestres; los manantiales, principalmente la Media Luna, se usan con fines turísticos, lo cual genera contaminación del agua y el suelo y daños a la fauna y flora endémicas. En el ámbito administrativo, se conforma el Comité Técnico de Aguas Subterráneas de Rioverde, el cual realiza acciones de monitoreo de la calidad del agua, hidrometría del acuífero y regulación de las extracciones mediante medidores (SEGAM, 2002).

2.4 Conclusiones

Con base en el estado del conocimiento y el historial de aprovechamiento del agua subterránea, la llanura de Rioverde se puede considerar como un sistema hidrológico regional, conformado por dos subsistemas: Valle de Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá) y Valle de Rioverde. Estos subsistemas presentan las características siguientes:

Valle Cerritos-Villa Juárez

Acuífero superficial, área de recarga local en ambiente cárstico y con dos zonas de aprovechamiento: i) Noroeste, presenta las siguientes características: depósito aluvial de origen calizo; grupo geoquímico de aguas, sulfatadas cálcicas; clases de agua para uso agrícola, C3S1 y C4S1; calidad de las aguas para uso doméstico, predominio de aguas impotables; nivel freático, 5 a 40 m; dinámica del acuífero, extracción menor a la recarga; estado administrativo, sin veda. ii) Suroeste, en depósitos aluviales de calizas y yesos, con características similares a la zona anterior.

Acuífero profundo, áreas de recarga local y regional ubicadas en fracturas y dolinas de las rocas calizas de las formaciones El Doctor y Guaxcamá, escasamente aprovechado, presenta las características siguientes: grupos geoquímicos de aguas, sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas; clases de agua para uso agrícola, C2S1, C3S1 y C4S1, con predominio de C3S1; calidad de las aguas para uso doméstico, principalmente aguas impotables; nivel piezométrico, aguas

ascendentes hasta cerca de la superficie; dinámica del acuífero, extracción menor a la recarga; estado administrativo, sin veda.

Manantiales, con áreas de recarga local, regional y posiblemente extraregional, se distinguen dos grupos, el primero conformado por Puerta del Río, El Baño, Ojo de León y Catarinas, el segundo integrado por Buenavista, El Carrizalillo, El Carrizal, La Cueva, El Plátano, Agua de en Medio y Agua Postrera; conjuntamente aportan un caudal aproximado de $1.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Las características de sus aguas son: grupo geoquímico de aguas, sulfatadas cálcicas; clases de agua para uso agrícola, C4S1 y C5S1; calidad de las aguas para uso doméstico, impotables; dinámica, perennes con respuesta al ciclo anual de precipitación; estado administrativo, aprovechamiento en pequeños regadíos ejidales, como abrevaderos e incipientemente para turismo local.

Este subsistema proporciona un caudal total de 5.7 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$, el cual se aprovecha para actividades agrícolas y urbanas. En la producción agrícola se utiliza un caudal de 5.3 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$; la superficie irrigada es de 1334 ha; los cultivos predominantes son el maíz para grano en rotación con chile y jitomate. En el área urbana y rural se utiliza un caudal de 0.40 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$; la población abastecida es de 62000 habitantes; las actividades económicas son el comercio, servicios e industria cementera.

Valle de Rioverde

Acuífero superficial, áreas de recarga local y regional en ambiente cárstico e ígneo, con dos zonas de aprovechamiento: i) *Norte*, dos áreas de aprovechamiento, la primera en los alrededores de Pastora, en depósito aluvial de origen calizo y basaltos, grupo geoquímico de aguas, sulfatadas cálcicas; clases de agua para uso agrícola, C4S1 y C5S1; calidad de las aguas para uso doméstico, predominio de aguas impotables; nivel freático, de 5 a 30 m; dinámica del acuífero, extracción mayor a la recarga; estado administrativo, con veda. La segunda área se localiza en la margen izquierda del río Verde, con características similares al área anterior. ii) *Suroeste*, depósito aluvial de origen ígneo y calizo, grupo geoquímico de aguas, bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas; clases de agua para uso agrícola, C1S1, C2S1 y C3S1, con predominio de C2S1; calidad de las aguas para uso doméstico, predominio de aguas potables; nivel freático, de 20 a 40 m; dinámica del acuífero, extracción mayor a la recarga; estado administrativo, con veda.

Manantiales, de origen cárstico, con áreas de recarga regional y posiblemente extraregional, se presentan en dos zonas: i) *Norte*, en dos grupos, el primero con San Bartolo, La Lagunita, Mojarras, Santa Rosa y El Baño; el segundo con Los Peroles, Las Sabanas, El Sabino y Poza Azul; ambos aportan un caudal aproximado de 845 L s^{-1} . ii) *Sur*, también en dos grupos, el primero constituido por Palma Larga, Carrizalito, La Rosa, Agua Sonadora, Charco Sentado, Charco Azul, El Álamo y La Virgen; el segundo conformado por Media Luna y Los Anteojos; los

dos grupos suman un caudal aproximado de 7241 L s^{-1} . Las aguas de los manantiales del norte presentan las características siguientes: grupo geoquímico sulfatadas cálcicas, clases de agua para uso agrícola, C4S1 y C5S1; calidad de las aguas para uso doméstico, impotables; dinámica de los manantiales, perennes con respuesta al ciclo anual de precipitación; estado administrativo, aprovechamiento en pequeños regadíos ejidales, abrevaderos e incipientemente para turismo local y regional. Las aguas de los manantiales del sur corresponden al grupo geoquímico sulfatadas cálcicas, las clases de agua para uso agrícola son C3S1 y C4S1, y la calidad de las aguas para uso doméstico corresponde a impotables, la dinámica de los manantiales es perenne y con respuesta al ciclo anual de precipitación, el estado administrativo corresponde al Distrito de Riego 049, de éstos nacimientos, la Media Luna se aprovecha adicionalmente para el turismo local, regional y nacional.

Este subsistema cuenta con un caudal total de 78.7 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$, el cual se aprovecha para la producción agrícola y al abastecimiento urbano y rural. Se divide en dos zonas: i) *Norte*, con dos áreas de aprovechamiento, la primera alrededor de la localidad de Pastora, donde la actividad agrícola y la población rural utilizan un caudal de 19.8 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$. En la superficie irrigada los cultivos predominantes son el maíz para grano en rotación con chile y jitomate; la población abastecida es de 12000 habitantes. La segunda área se localiza en la margen izquierda del río Verde, donde la producción

agrícola y el consumo doméstico de la población rural utilizan un caudal de 21.29 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$; en la superficie irrigada los cultivos predominantes son alfalfa y avena, y maíz para elote en rotación con chile y jitomate. ii) *Suroeste*, dispone de un caudal total de 37.8 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$, el cual se usa con fines agrícolas y para el abastecimiento de poblaciones urbanas y rurales; en la producción agrícola se utiliza un caudal de 34.4 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$; los cultivos predominantes son el maíz en rotación con chile, jitomate, tomate y calabacita, y naranja y mandarina. En el área urbana y rural se utiliza un caudal de 3.4 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$; la población abastecida es de 62000 habitantes; las actividades económicas principales son el comercio y los servicios.

Con base en lo anterior, se acepta la hipótesis: los datos históricos del conocimiento y aprovechamiento, permiten explicar la forma en que ha ocurrido el abatimiento del agua subterránea en el área de estudio.

2.5 Literatura citada

Acosta P., R., *El valle agrícola y agrario de Río Verde, S.L.P.*, 1934, 44 pp.

Anónimo, *San Luis Potosí The History of the State*. Panamerican Magazine, 1906, 11 pp.

Ballín C. J. R., *Caracterización y manejo del hidrosistema de la región agrícola de Rioverde*, tesis de maestría en Hidrosistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, 2003, 160 pp.

Campos A., F. D., *Análisis agro-climático preliminar del estado de San Luis Potosí*, Agrociencia, Enero-marzo de 1993, Vol 4, núm. 2, pp 19-43.

Candelaria, Arturo, Salvador Martínez, Salvador Silva, Javier Benavente, Eduardo González, Braulio García, Dionisio Castillo, Juan Antonio Araiza, Antonio Cardona, Leticia Padilla, Jorge Aceves y J. Refugio Ballín. Estudios prioritarios para la recarga del acuífero Ciudad Fernández. San Luis Potosí, Informe Técnico, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. S.L.P., 2005, 124 pp.

CNA, Estudio geohidrológico de la zona de Cerritos y Guadalcazar, S.L.P.. San Luis Potosí, ROASA, contrato S/N, CNA. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal San Luis Potosí, México, D.F., 1983, (sp).

CNA, Comisión Nacional del Agua, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Verde. Distrito Federal: México, 2004, 35 pp.

Charcas S., H., E. Olivares S. y J. R. Aguirre R., *Agua de riego en la región de Rioverde, San Luis Potosí, México*, Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XVII, núm. 4, octubre-diciembre, 2002, pp 37-56.

DGE, Primer Censo Agrícola-Ganadero, San Luis Potosí, México, D.F., 1930, 131 pp.

- DGE, Primer Censo Agrícola-Ganadero y Ejidal 1950, San Luis Potosí, México, D.F., 1957, 320 pp.
- DGE, V Censos Agrícola Ganadero y Ejidal 1970, San Luis Potosí, México, 1975, 300 pp.
- Gálvez, Vicente, Apolinar Hernández y Luis Blázquez, *Estudios Hidrogeológicos Practicados en el Estado de San Luis Potosí*. México: Universidad Nacional de México: Instituto Panamericano de Geografía e Historia, 1941, 234 pp.
- García, E., *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen*, México, D.F., 1988, 217 pp.
- HIDROTEC, Informe del estudio geohidrológico preliminar en la zona de Ríoverde, S.L.P. Tomo I, 1972, 181 pp.
- INEGI, Anuario estadístico del estado de San Luis Potosí, tomo I, México, D.F., 2006, 498 pp.
- INEGI, Estudio hidrológico del Estado de San Luis Potosí, México, D.F., 2002, 136 pp.
- INEGI, San Luis Potosí. Resultados definitivos. VII. Censo agrícola-ganadero, tomo I, México, 1994, 505 pp.
- Medina Rivero, F., Estudio Geohidrológico de la Región de Cerritos-Villa Juárez S.L.P.. Folleto Técnico Instituto de Geología y Metalurgia de la Universidad de San Luis Potosí, 1966, 17 pp.
- Montañas, A., *Hidrogeoquímica del municipio de Ríoverde, San Luis Potosí*, trabajo recepcional, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, 1992, 91 pp.

- Obregón, M. B., *LA IRRIGACIÓN: Por medio de presas, canales, avenamientos y pozos artesianos*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, segunda edición, 1923, 128 pp.
- Ordóñez, E., *El valle de Cerritos, San Luis Potosí*. En *VIDA y OBRA Obra científica IV (1905-1931)*. México: El Colegio Nacional. 1996, 489 pp.
- Paredes, T., *Estudio hidrológico de la región de Rioverde y Arroyo Seco, en los estados de San Luis Potosí y Querétaro*, 1909, 47 pp.
- PROYESCO, Trabajos complementarios del estudio geohidrológico de la zona de Río Verde, S.L.P. Tomo I, 1980, 96 pp.
- SARH, Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de San Ciro, San Luis Potosí, Geohidrología Mexicana, S.A., contrato GZA-79-42-ED, SARH. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica. Dirección General de Programas de Infraestructura Hidráulica, Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, México, D.F., 1979. (sp).
- Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental (SEGAM), Plan de Ordenamiento Ecológico del Valle de Rioverde y Ciudad Fernández. San Luis Potosí, México, 2000, 139 pp.
- SRH, Inventario de aprovechamientos superficiales y subterráneos para riego. San Luis Potosí, Irrigación y Control de Ríos, Dirección de Pequeña Irrigación, Secretaría de Recursos Hidráulicos, México, 1966, 117 pp.

Villalobos, Crescencio I. y Enrique Díaz de León, Composición de Aguas en el Estado de San Luis Potosí Período 1961-1985. Universidad Autónoma de San Luis Potosí: Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, 1985, 114 pp.

3 Estado actual del aprovechamiento del agua subterránea en el valle de Rioverde, San Luis Potosí, México

Resumen

El valle de Rioverde, geográficamente se puede dividir en dos zonas: i) Norte, de aguas sulfatadas cálcicas, con conductividad eléctrica entre 2359 y 4501 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 25°C, impropia para consumo humano aunque se aprovechan en la producción de cosechas. ii) Sur, de aguas bicarbonatadas cálcicas, con conductividad eléctrica entre 240 a 2515 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 25°C, con diferentes posibilidades de uso. Ambas zonas presentan diferencias en calidad del agua, sistemas de extracción, aplicación del agua para riego y patrones de cultivos, dichas diferencias se acentúan en la zona sur. Considerando lo anterior, el objetivo del trabajo fue reconocer y jerarquizar los factores que influyen en el aprovechamiento del agua subterránea para uso agrícola y sus implicaciones en el abatimiento del nivel freático en la porción sur del

valle de Rioverde. El procedimiento de trabajo fue: i) recopilar y analizar información censal y de archivos sobre el aprovechamiento del agua subterránea del valle de Rioverde; ii) realizar una encuesta entre agricultores propietarios de pozos. La información censal y de archivos se sintetizó en cuadros. La información de la encuesta se analizó mediante estadística multivariable. Los resultados indican que el aprovechamiento del agua subterránea se puede caracterizar con las variables aplicación del agua y patrón de cultivos. Asimismo, los agricultores se pueden agrupar con base en su actitud hacia la adopción de normas que regulan la extracción, en la implementación de tecnologías para la extracción y aplicación del agua y en la transformación de sus patrones de cultivos.

Palabras claves: Agua subterránea, valle, pequeños regadíos, patrón de cultivos, bombeo de pozos, análisis multivariable, aplicación del agua, Rioverde, San Luis Potosí.

Abstract

The Rioverde valley, geographically can be divided into two areas: i) North, of calcium sulfate water, with electrical conductivity between 2359 and 4501 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 25°C, inappropriate for human consumption, although exploit in crop production. ii) South, of calcium bicarbonate waters, with electrical conductivity between 240 to 2515 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 25° C, with different possibilities for use. Both areas differ in water quality; extraction systems, water application for irrigation and cropping patterns, these differences are more intensive in the south area. Considering the above,

the objective was to recognize and prioritize the factors influencing exploitation of groundwater for agricultural use and its implications in the dejection of phreatic level of the south portion of the Rioverde valley. The working procedure was: i) to collect and analyze census data and files on the use of groundwater at the Rioverde valley; ii) to do a survey among farmers own wells. The census information and archives are synthesized in tables. Information from the survey were analyzed using multivariate analysis. The results indicate that the exploitation of the groundwater of the Rioverde valley can be characterized with the water application and crop pattern variables. Also, farmers can be grouped based on their attitude toward the adoption of rules governing the extraction, in the implementation of technologies for the collection and application of water and in the transformation of crops patterns.

Key words: Groundwater, valley, smalls irrigations, crop pattern, pumping wells, multivariate analysis, water application, Rioverde, San Luis Potosí.

3.1 Introducción

Administrativamente, la Comisión Nacional del Agua denomina Acuífero Rioverde a las aguas subterráneas localizadas en el valle del mismo nombre (CNA, 2002), el cual se extiende 60 km de norte a sur y 35 km de este a oeste; sus límites naturales son: hacia el noreste la sierra de San Francisco y los cerros Vetado y Viejo; al este los cerros La Aguanosa, El Almagre, Mesas Cuatas y el Chichote; al sureste y sur los cerros La Lágrima y Grande; al oeste y noroeste los cerros de

Cieneguilla, San Diego y Jabalí y las sierras La Noria y El Tablón (figura 6). El valle comprende porciones de los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández, que presentan una población urbana y rural de 126997 habitantes. El valle comprende una superficie abierta al cultivo de 49496 ha, de las cuales 15132 cuentan con agua para riego. En el área de riego, los cultivos predominantes son: naranja, jitomate, chile, tomate, calabacita, maíz elotero y alfalfa (INEGI, 1994; INEGI, 2006).

Según los estudios contratados por la Secretaría de Recursos Hidráulicos y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, las aguas subterráneas del valle de Rioverde están localizadas en dos acuíferos: i) Superficial (rellenos aluviales), sus zonas de recarga se localizan en las sierras circundantes, su flujo predominante es de noroeste a sureste, con dirección hacia el río Verde, y su descarga es a través de 1271 pozos. Al norte del valle, las aguas provienen de la región cárstica del noroeste; al sur, en la margen derecha del río Verde las aguas provienen del sistema de sierras El Jabalí, San Diego y Cieneguilla situadas al suroeste del valle. ii) Profundo (rocas calizas de la Formación El Doctor y Guaxcamá), tiene sus zonas de recarga en las sierras circundantes, su flujo general es hacia el centro del valle para concentrarse en el río Verde, su descarga es a través de cinco grupos de manantiales, entre los que destacan Media Luna, Charco Azul, Los Peroles, San Bartolo y Puerta del Río (SRH, 1966; Alvarado, 1973; SARH, 1979; Montañes, 1992; INEGI, 2002).

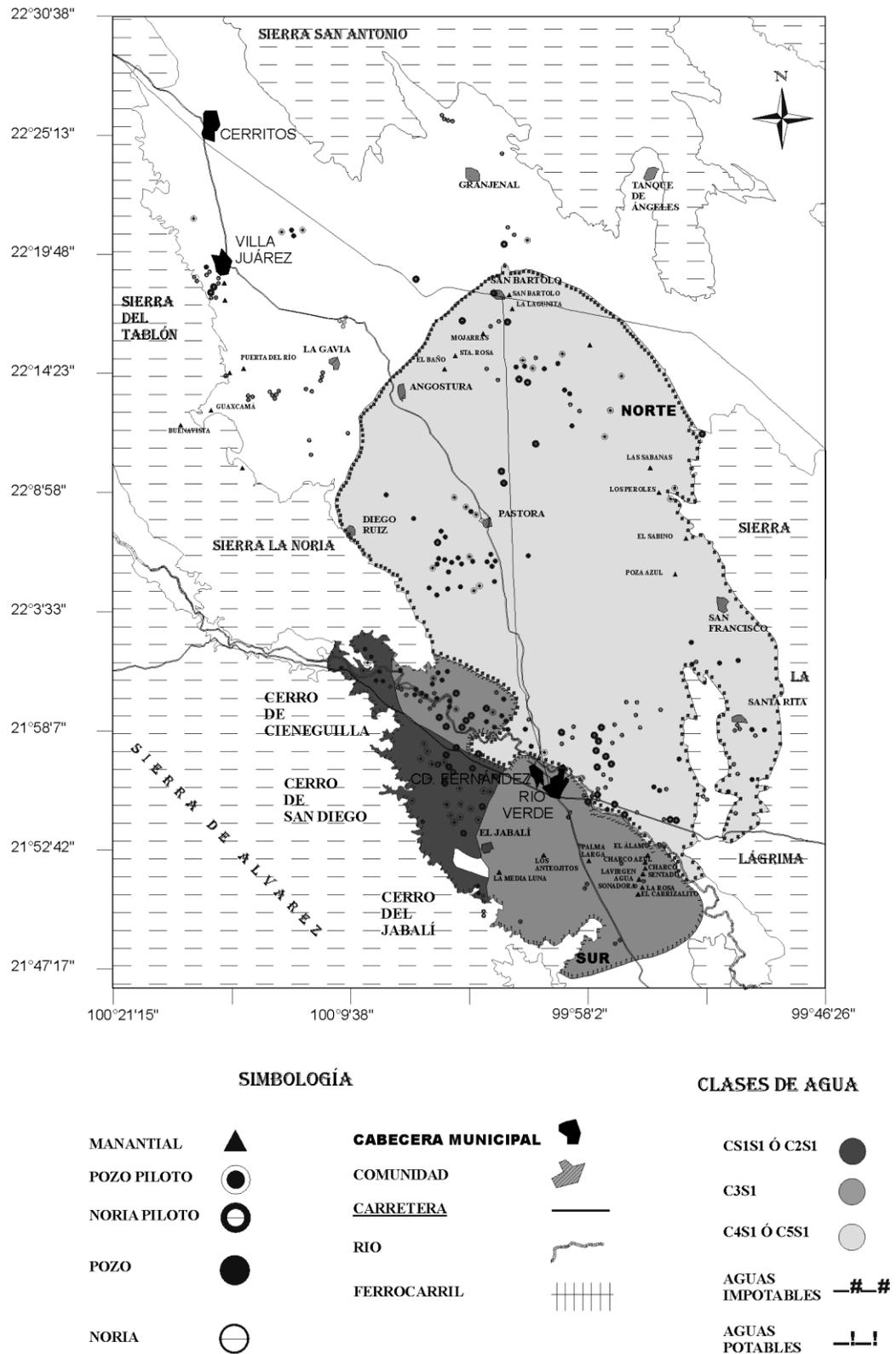


Figura 6. Pozos y manantiales en las porciones norte y sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México (adaptado de Charcas, 2002)

Geográficamente, el valle de Rioverde puede dividirse en dos zonas: i) Norte, donde las aguas corresponden principalmente al grupo geoquímico sulfatadas cálcicas, las cuales presentan valores de conductividad eléctrica que varían de 2359 a 4501 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 25°C, equivalentes a 1415.4 y 2700.6 mg L^{-1} de sólidos totales disueltos.

Estos valores exceden el límite permisible de la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, lo cual las hace impropias para el consumo humano, aunque algunas se aprovechan en la producción animal y de cosechas. Los suelos irrigados de esta zona se caracterizan por presentar valores de conductividad eléctrica mayores que 4 dS m^{-1} a 25°C y corresponden principalmente a las clases Solonchaks háplicos (SCh), Phaeozems cálcáricos (PHc) y Vertisoles eútricos (VRe), en los cuales es posible el cultivo de plantas tolerantes a sales. La población humana se agrupa en localidades de 1 a 2483 habitantes; sus actividades económicas son la ganadería extensiva y la producción de cosechas bajo temporal y en pequeños regadíos abastecidos por pozos profundos y manantiales. ii) Sur, aquí las aguas corresponden principalmente al grupo geoquímico bicarbonatadas cálcicas, las cuales presentan valores de conductividad eléctrica que varían de 240 a 2515 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 25°C, equivalentes a 144 y 1509 mg L^{-1} de sólidos totales disueltos, lo cual implica diferentes clases de agua y posibilidades de uso (consumo humano, producción animal y de cosechas). Los suelos irrigados se caracterizan por su conductividad eléctrica menor que 4 dS m^{-1} a 25°C, y corresponden a las clases Phaeozems háplicos (PHh) y

Vertisoles eútricos (VRe), en los que se producen diversos cultivos como maíz para elote, chile, jitomate, tomate, naranja y alfalfa. La población humana (81134 habitantes) se asienta en la conurbación de las cabeceras municipales de Rioverde y Ciudad Fernández, la congregación El Refugio y las comunidades de San Marcos y Puente del Carmen; el resto de la población está agrupada en localidades menores que 1983 habitantes. Las actividades económicas en la conurbación son el comercio y los servicios; y en la zona rural, la producción de cosechas de riego y de temporal y la ganadería en corrales de engorda (CETENAL, 1973; FAO-UNESCO, 1991; INEGI, 2001 b; Charcas, 2002; Charcas *et. al.*, 2002).

Así, en la región la calidad del agua subterránea y de los suelos utilizados en la producción agropecuaria, han condicionado los sistemas de producción primaria y el crecimiento y desarrollo de los núcleos de población. En la zona norte, dichos sistemas incluyen cultivos tolerantes a sales, producción de équidos y caprinos en agostaderos con vegetación xerófila y halófila y localidades menores que 2500 habitantes. En contraste, en la zona sur, los sistemas de producción comprenden cultivos poco tolerantes a las sales y muy demandantes de agua; producción intensiva de ganado vacuno para carne con gran requerimiento de agua; y una conurbación con gran consumo de agua y generación de aguas residuales que se vierten sin tratamiento al río Verde.

Las diferencias en el aprovechamiento del acuífero Rioverde entre sus zonas norte y sur, se reflejan en disimilitudes en la calidad del agua, sistemas de extracción y de riego y, descenso del nivel freático, así como en los sistemas de abastecimiento de agua potable. Estos aspectos del aprovechamiento son más intensos en la zona sur, de tal manera que sus efectos negativos serán probablemente evidentes a corto y mediano plazo en esta zona. Considerando lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue reconocer y jerarquizar los factores que influyen en el aprovechamiento del agua subterránea para uso agrícola y sus implicaciones en el abatimiento del nivel freático en la porción sur del valle de Rioverde.

Para el cumplimiento del objetivo anteriormente descrito, se probó la hipótesis siguiente: el análisis de los sistemas agrícolas y su respectiva infraestructura hidráulica permite reconocer y jerarquizar sus factores limitativos del uso racional del agua de riego.

3.1.1 Descripción del área de estudio

3.1.1.1 Clima

El valle de Rioverde se presenta un gradiente climático de noreste a suroeste, que va del seco semicálido al semicálido subhúmedo. En el noreste, el clima se caracteriza por valores de precipitación, evapotranspiración potencial y temperatura medias anuales de 375.1 mm, 1238.1 mm y 20.1°C, respectivamente; en el suroeste, dichos valores son de 778.1 mm, 1222.3 mm y 18.2°C, respectivamente.

En general, el régimen de precipitación es de verano y abarca de junio a septiembre y coincide con el periodo caliente del año; asimismo, el déficit medio anual de precipitación varía de 863.3 a 444.2 mm (García, 1988; Campos, 1993). Con base en la información climática anterior y la Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, Escala 1:250000 (INEGI, 2003), se puede inferir que el área de recarga y la cantidad de agua anual promedio precipitada son 109.6 km² y 65.76 millones de m³, respectivamente.

3.1.1.2 Suelos

Con base en la Carta Edafológica y el Mapa Mundial de Suelos, los suelos en las zonas de recarga local y regional pertenecen a las clases Leptosoles líticos (Lpq) y Leptosoles réndricos (Lpk). En la zona agrícola, los suelos irrigados pertenecen a la clase Phozems háplicos (PHh). En las zonas de recarga, la pendiente, y la discontinuidad y poca profundidad de los suelos, favorecen la rápida escorrentía superficial del agua de lluvia; en la zona agrícola, la continuidad, la mayor profundidad y la textura media de los suelos permiten que el agua de lluvia y de riego se infiltre y fluya hacia la capa freática (CETENAL, 1973; FAO-UNESCO, 1991).

3.1.1.3 Vegetación

En el área de recarga, la vegetación predominante corresponde al matorral submontano (Rzedowski, 1966). Este tipo de vegetación en combinación con las características del suelo, el clima y la topografía dan lugar a un coeficiente de escorrentía de 20%; por lo tanto, para el

área de recarga se tiene que los volúmenes anuales de escorrentía superficial e infiltración son 13.15 y 52.61 millones de m³, respectivamente (INEGI, 2003).

3.1.1.4 Geología

El área de estudio está formada por rocas sedimentarias de origen marino y continental; además, por rocas ígneas extrusivas del terciario (figura 7). Las rocas sedimentarias de origen marino forman las sierras que rodean el valle.

Estructuralmente, forman plegamientos anticlinales normales y recumbentes, con ejes orientados en dirección noroeste-sureste y buzamiento hacia el suroeste. Los depósitos sedimentarios continentales son de dos tipos: clásticos de ambiente lacustre y fluvial, representados por gravas, arenas, limos y arcillas; y químicos, representados por travertino, caliches y tierras silíceas. Las rocas ígneas están representadas por lavas riolíticas (SARH, 1979; Labarthe *et al.*, 1989).

Estratigrafía. En el área aflora una secuencia integrada de la siguiente manera: formaciones sedimentarias marinas del jurásico y cretácico; formaciones ígneas y sedimentos continentales del terciario; así como aluviones del cuaternario (SARH, 1979; Labarthe *et al.*, 1989).

Jurásico. Este período está representado por la formación Huayacocotla, la cual aparece en un pequeño afloramiento ubicado en el camino de San José de las Flores a Alamos. Consiste en una

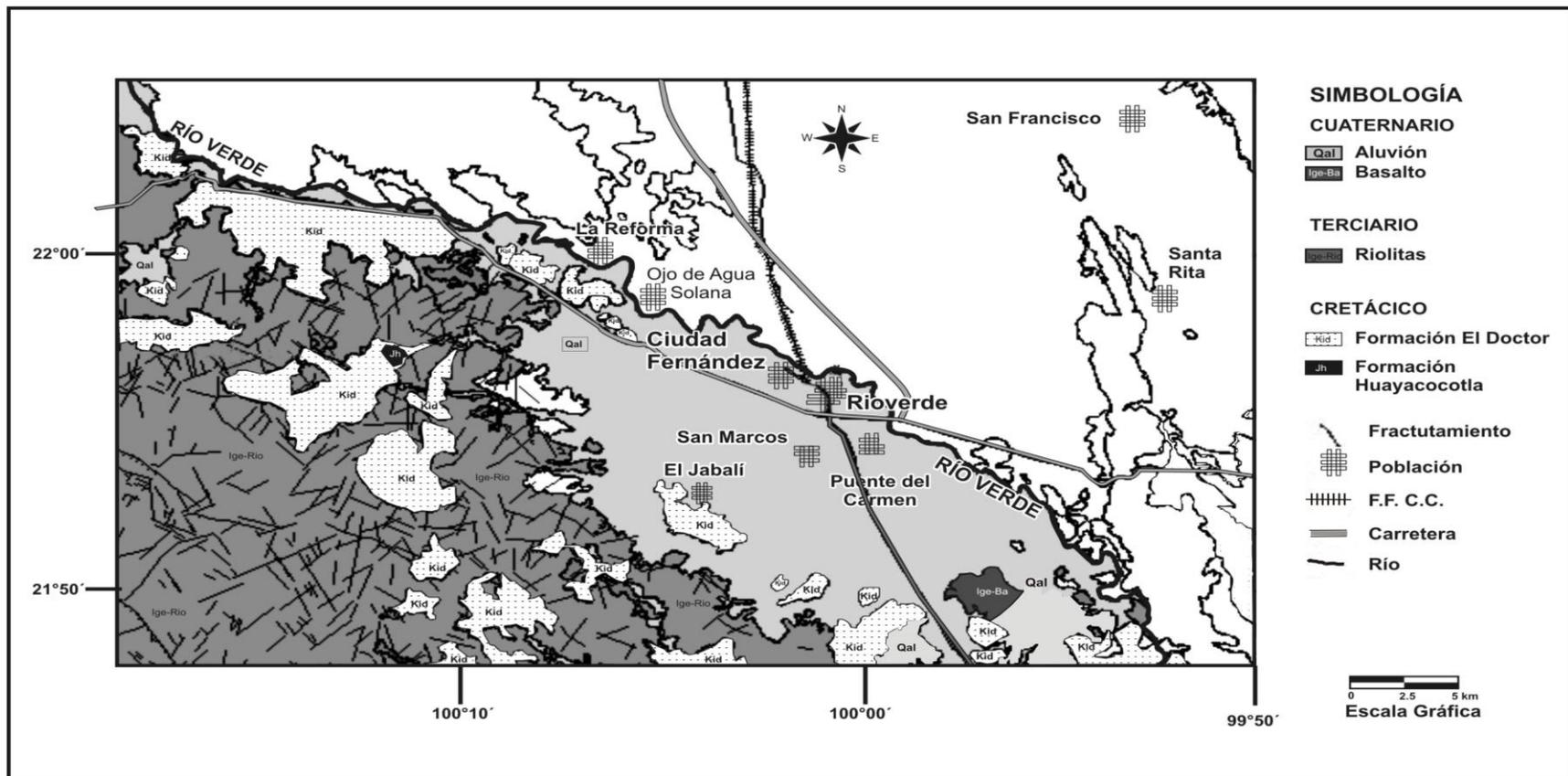


Figura 7. Formaciones geológicas de la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México (adaptado de Labarthe *et al.*, 1989 y Montañes, 1992)

intercalación de lutitas con areniscas; las capas presentan numerosos pliegues *chevron* y recostados. Esta formación subyace con discordancia a la formación El Doctor, por lo que se le considera la unidad más antigua de la región. Se le atribuye una edad del sinemuriano-pliensbaquiano (Labarthe *et al.*, 1989).

Cretácico. Este período está representado por las siguientes formaciones:

- Formación Guaxcamá, está constituida por yesos estratificados. Intercaladas entre los yesos, se encuentran capas de calizas dolomíticas, las cuales llegan a formar bancos gruesos. En la parte inferior de esta formación, estratificado entre los yesos, se encuentra un cuerpo de calizas microcristalinas y dolomíticas, fuertemente fracturadas. A esta formación se le atribuye una edad del aptiano (INEGI, 1985).
- Formación El Doctor, está constituida por capas de calizas con abundantes restos de microfósiles y huellas de disolución. Las estructuras que forma son pliegues anticlinales y sinclinales de orientación noroeste-sureste. Con base en los afloramientos del área, se estima que su espesor puede ser del orden de los 2000 m. Se le considera del albiano-cenomaniano (SARH, 1979; Labarthe *et al.*, 1989).

Terciario. Este período está representado por derrames riolíticos de gran extensión, así como por depósitos tobáceos de menor extensión.

Los derrames riolíticos forman una capa extensa con dirección general Noroeste (NW)- Sureste (SE), la cual llenó todas las barrancas y hondonadas preexistentes. Algunas veces los derrames son de gran volumen y formaron elevaciones como el cerro de Alisos; sin embargo, dejaron descubiertas algunas eminencias de la formación El Doctor. Estos afloramientos corresponden generalmente a riolitas, aunque existen algunas áreas con afloramientos de tobas riolíticas. Con base en su posición estratigráfica y características litológicas, se les asigna una edad del mioceno (SARH, 1979; INEGI, 1985).

Cuaternario. Los depósitos aluviales de este período consisten en gravas, arenas, limos y arcillas de origen ígneo y calizo, procedentes de los afloramientos vecinos (SARH, 1979; INEGI, 1985; Labarthe *et al.*, 1989).

Los sedimentos clásticos, se presentan como afloramientos aislados de fragmentos redondeados a subarredondados de rocas volcánicas; se considera que son del Cuaternario, aunque pueden pertenecer a la parte tardía del Mioceno. El espesor conocido de estos materiales de relleno es alrededor de 184 m, y sus componentes se alternan con capas de arcillas, arenas y gravas, cubiertos de tobas arenoarcillosas, con evidencias de calcificación, y por conglomerados y tobas pumíticas (SARH, 1979; Labarthe *et al.*, 1989). Como sedimento químico destaca el travertino, el cual se encuentra a lo largo del río Verde y en el área comprendida entre Rioverde y Plazuela; este material está constituido

por cuerpos porosos, bien estratificados. El caliche en cambio se presenta con una distribución irregular y cubre las rocas calcáreas de las partes bajas de las sierras (Montañes, 1992).

Elementos estructurales (Fracturas). En las zonas de recarga local y regional, las formaciones rocosas ígneas y calizas están muy fracturadas; ambas zonas presentan tres patrones en la orientación de las fracturas noreste-suroeste, noroeste-sureste y norte-sur; la mayoría de estas fracturas interceptan el flujo de los numerosos arroyos, depresiones y dolinas que existen en toda el área de recarga. La escorrentía interceptada fluye a través de conductos subterráneos y descarga en dos tipos de acuíferos: i) superficial granular, el cual se aprovecha por medio de pozos perforados a una profundidad menor que 150 m; ii) profundo calizo, con descarga natural a través de dos grupos de manantiales, uno conformado por La Media Luna y Los Antejitos, y el otro por Palma Larga, El Carrizalito, La Rosa, Agua Sonadora, Charco Sentado, Charco Azul, El Álamo y La Virgen. La escorrentía que no es interceptada por las fracturas, una porción es captada en la presa San Diego, y la otra fluye hacia las partes bajas y forma el humedal aledaño a los manantiales de La Media Luna y Los Antejitos (HIDROTEC, 1972; SARH, 1979; PROYESCO, 1980; INEGI, 2001 a).

3.1.1.5 Hidrología Subterránea

Acuífero granular. Antes de 1950, el acuífero superficial estaba prácticamente sin aprovecharse con fines agrícolas, pues sólo existían algunos pozos a cielo abierto para consumo doméstico en las diferentes comunidades rurales y en las ciudades de Rioverde y Ciudad Fernández, su recarga fluía como agua freática y descargaba en varios manantiales, entre los cuales destacaban por su caudal Ojo de Agua de Solano, Puente de los Hornos, Arroyo Hondo, Las Higueras y San Antonio. El nivel freático en la porción central (El Refugio) era de 3.5 a 4.5 m (Paredes, 1909; Obregón, 1923; Acosta, 1934).

Según la información de que se dispone, la evolución del aprovechamiento agrícola de este acuífero se puede dividir en tres etapas:

- De 1950 a 1972. En esta etapa se inició la extracción de agua para riego, principalmente por medio de pozos a cielo abierto equipados con motores de combustión interna y bombas centrífugas. Entonces, el nivel freático en el borde del valle presentaba una profundidad de 3 m, mientras que en la porción central llegaban a 10 m; la dirección del flujo en el área de Cieneguilla-San Martín era de oeste a este, y en el área del Refugio-Jabalí, de suroeste a noreste; y la extracción era estimada en 8 millones de m^3 año⁻¹ (SRH, 1966; HIDROTEC, 1972). Como consecuencia de este aprovechamiento algunos

manantiales localizados en el borde del río Verde desaparecen y otros disminuyen drásticamente su caudal.

- De 1972 a 1980. En esta etapa se incrementa el número de pozos profundos equipados con motores eléctricos y bombas de turbina (información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua y el Distrito de Desarrollo Rural 130). El nivel freático en el borde del valle era de 6 m, mientras que en la porción central se redujeron a 12 m; la dirección del flujo se uniformiza de suroeste a noreste; y la extracción estimada fue de 16.1 millones de m^3 año^{-1} (PROYESCO, 1980). Debido a esta extracción desaparecen todos los manantiales del borde del río Verde. Con base en lo anterior, se puede inferir que la recarga del área estudiada es de 16.1 millones de m^3 año^{-1} .
- De 1980 a 2003. Predominan los pozos profundos equipados con motores eléctricos de mayor potencia y bombas de turbina y sumergible. El nivel freático en el borde del valle era de 10 m, mientras que en la porción central de 45 m; la dirección del flujo no presenta cambios, la extracción estimada fue de 37.80 millones de m^3 año^{-1} (CNA, 2002; Ballín, 2003).

Con base en la información anterior se puede señalar lo siguiente:

- Alrededor de 1980, el agua que se extraía para la producción agrícola correspondía a la recarga del acuífero superficial.

- Actualmente en dicho acuífero la extracción supera la recarga en 21.7 millones de m^3 al año⁻¹, lo cual indica que se está aprovechando agua almacenada históricamente.

Acuífero calcáreo. Su descarga natural es a través de dos grupos de manantiales: i) el grupo está ubicado al suroeste del valle, se conforma por los manantiales de la Media Luna ($4.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y Los Anteojos ($0.150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$); ii) el otro grupo se encuentra en la margen derecha del río Verde, aguas abajo de la ciudad del mismo nombre, y está conformado por ocho nacimientos, La Virgen ($0.112 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), El Álamo ($0.065 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), Charco Azul ($0.189 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), Charco Sentado ($0.061 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), Agua Sonadora ($0.598 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), La Rosa ($0.051 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), Carrizalito ($0.068 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y Palma Larga ($1.197 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). El caudal total de ambos grupos era de $7.19 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Alvarado, 1973; SARH, 1979).

3.2 Materiales y Métodos

Recopilación y análisis de información de archivos sobre el aprovechamiento del agua subterránea del valle de Rioverde. Se consultaron los archivos de la Comisión Nacional del Agua (Gerencia Estatal) y del Distrito de Desarrollo Rural No. 130. La información obtenida se ordenó cronológicamente en cuatro etapas: antes de 1950, sin aprovechamiento del agua subterránea con fines agrícolas; periodo 1950 a 1972, con predominio de pozos a cielo abierto con motores de combustión interna y bombas centrífugas; periodo 1972 a 1980, ocurre la transición a motores eléctricos y bombas de turbina; periodo de 1980

a 2003, predominio de pozos profundos con motores eléctricos, y bombas de turbina y sumergibles. Para cada periodo se realizó una síntesis de la tecnología de extracción y aplicación del agua, y de los sistemas agrícolas irrigados.

Encuesta a los agricultores propietarios de pozos. En la porción sur del valle de Rioverde, entre julio y diciembre de 2006, se encuestaron 85 agricultores. El cuestionario se preparó con base a lo propuesto por Perales (1998), Namakforoosh (2000) y Charcas (2002). La temática comprendió infraestructura hidráulica, propiedad del pozo y de la tierra, forma de organización, sistemas de cultivo, sistemas de aplicación del agua, costo de producción y rentabilidad, comercialización, crédito y apoyo oficial.

Con los datos recabados se conformó una matriz de 85 filas por 49 columnas, donde las filas correspondieron a los propietarios de los pozos y las columnas a las variables consideradas. Los nombres de los propietarios de los pozos y las variables se sustituyeron por claves y acrónimos. Los datos se estandarizaron relativizándolos con respecto al valor máximo de cada una de las variables; este ajuste tiende a igualar las escalas de las variables con poca variación con las variables con valores extremos (Höft et al., 1999; McCune y Mefford, 1999).

El análisis de la información consistió primero en una ordenación preliminar de la matriz, con el fin de eliminar las variables con bajo coeficiente de variación y redundantes; así, sólo se conservaron 10

variables de un total de 49. La información de la matriz definitiva se analizó mediante componentes principales a partir de la matriz de correlaciones, debido a que el porcentaje de varianza explicada para el primer eje fue mayor que el generado por el análisis de correspondencias sin tendencias (DCA) (ter Braak, 1987; Flores y Yeaton, 2000; Hiltbrunner *et al.*, 2007). Posteriormente, la matriz se clasificó en forma jerárquica, divisiva y politética, mediante TWINSpan (Höft *et al.*, 1999; McCune y Mefford, 1999); ambas técnicas de análisis multivariable forman parte del programa PC-ORD V.4. (McCune y Mefford, 1999).

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Evolución del aprovechamiento del agua subterránea

En el área de estudio se han realizado tres censos de aprovechamientos subterráneos para riego (cuadro 1), cuya temática ha variado de manera que el *primero y segundo censos* se enfocaron a caracterizar los pozos, el equipamiento y superficie irrigada; y el *tercer censo*, se orientó a la caracterización de los pozos, el equipamiento y los sistemas de producción. Con base en la información de estos tres censos, el aprovechamiento del agua subterránea tanto en el acuífero superficial como en el profundo ha evolucionado de la manera siguiente.

3.3.1.1 Censo de 1966. El aprovechamiento del acuífero superficial se realizaba por medio de 115 pozos, principalmente a cielo abierto (77%),

Cuadro 1. Evolución de las características generales de los pozos y su equipamiento en la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México

Tipo de pozo/año	Número y profundidad de pozos, tipo de motor, tipo y potencia de la bomba y diámetro de ademe y descarga									
	Porcentaje de pozos	Profundidad del pozo (m)	Tipo de motor		Potencia de la bomba (kw)	Tipo de bomba		Diámetro de ademe (m)	Diámetro de descarga (cm)	
			Combustión interna (%)	Eléctrico (%)		Centrífuga (%)	Turbina de flecha (%)	Sumergible (%)		
1966										
Cielo abierto	77	3 a 36	77		2.2 a 20.9	100			1 a 6.5	3.8 a 25
Profundo	23	38 a 73	23		3.0 a 37.3	100			0.20 a 0.40	7.5 a 20
1988										
Cielo abierto	22	5 a 30	85	15	3.7 a 18.6		96	4	1.2 a 4	2.5 a 20
Profundo	78	13 a 75	90	10	4.5 a 63.4	7	86	7	0.20 a 0.40	5.0 a 20
2003										
Cielo abierto	5	15 a 60	75	25	6.0 a 7.5		92	8	1.2 a 1.4	7.5 a 10
Profundo	95	13 a 330	15	85	7.5 a 93.2	0.50	75	24.50	0.15 a 0.40	7.5 a 20

Fuente: SRH (1966); Información proporcionada por CNA y DDR No. 130 (1988) y Ballín (2003).

y excavados a una profundidad máxima de 36 m. Otras características de estos pozos eran su diámetro de 1.0 a 6.5 m, paredes revestidas con ladrillo, extracción del agua con motores de combustión interna de 2.2 a 20.9 kW y bombas centrífugas, diámetro del tubo de succión de 7.5 a 20 cm, y caudal de 7 a 60 L s⁻¹ (SRH, 1966). Con base en los resultados se detecta un abatimiento del acuífero superficial, y se califica su condición hidrogeológica como “sobreexplotado”, por lo que se decreta una veda de mayor extracción el 9 de julio de 1966.

3.3.1.2 Censo de 1988. Continuaba el uso del acuífero superficial pero mediante 179 pozos, la mayoría de ellos profundos (78%). La profundidad máxima de estos pozos era de 75 m, diámetro del ademe de 20 cm a 40 cm, extracción con motores de combustión interna y eléctricos de 4.5 a 63.4 kW y bombas de turbina y caudal de 3 a 36 L s⁻¹ (Información proporcionada por el Distrito de Riego 130 y la Comisión Nacional del Agua). A pesar de que el acuífero superficial estaba vedado, el número de pozos se incrementó en un 55% y su profundidad en 39 m; además, se inició la electrificación de la porción suroeste del valle, lo cual facilitó el incremento de su uso y agravó su condición de sobreexplotado.

3.3.1.3 Censo de 2003. Ya entonces se había iniciado el aprovechamiento de ambos acuíferos (superficial y profundo) mediante 237 pozos (95% profundos perforados hasta 225 m), con motores

eléctricos de 3.7 a 93.2 kW, bombas de turbina y sumergibles y caudal de 3 a 100 L s⁻¹ (Ballín, 2003).

Con base en lo precedente, se puede afirmar que la profundización en el nivel freático está asociada con la modificación de las características de los pozos y la tecnología de extracción del agua.

Estas tendencias son similares a las encontradas en otros acuíferos del país. Así, en la costa de Hermosillo, Sonora, el aprovechamiento de este acuífero se inició en 1945, con aproximadamente 15 pozos y el nivel freático de 1 a 20 msnm; para 1965, el número de pozos era de 484 y el nivel freático descendió 16 y 22 m pero por debajo del nivel del mar, como resultado de una extracción 300 % superior a la recarga natural; lo anterior provocó la intrusión de agua del mar y el gobierno federal tuvo que decretar la reducción de la extracción y la relocalización de 105 pozos afectados por la intrusión salina (Jiménez, 1965; Jardines, 1976; Silva, 2005). En el caso de la región Lagunera, el acuífero Principal comenzó a aprovecharse alrededor de 1963 y su profundidad promedio era de 45 m; para 1984 operaban 1958 pozos y la profundidad media se redujo a 62 m, como consecuencia de una extracción 111 % superior a la recarga natural del acuífero; la reacción gubernamental fue sólo fomentar el uso eficiente del agua (Cruz y Levine, 1998).

3.3.2 Evolución del área irrigada

De acuerdo con los censos oficiales la superficie irrigada y el patrón de cultivos (cuadro 2) han evolucionado de la manera siguiente.

3.3.2.1 Periodo de 1950 a 1970, la superficie irrigada se incrementó a 2300 ha, las cuales sólo se sembraban con riego durante el ciclo primavera-verano, pues durante el de otoño-invierno se cultivaban bajo temporal; esto significa que sólo se extraían del acuífero superficial alrededor de 12 millones de m^3 año⁻¹. Además, sólo se cultivaban variedades criollas de maíz para grano, chile y jitomate; asimismo, como el último tercio del ciclo de riego coincide con el inicio de la temporada de lluvias, se dejaban de aplicar uno o dos riegos. En este periodo cambió la tecnología de extracción de motores de combustión interna a los accionados con energía eléctrica, y se establecieron dos ciclos agrícolas (DGE, 1930; Acosta, 1934; DGE, 1957; Martínez, 1970; DGE, 1975).

3.3.2.2 Periodo de 1970 a 1994, la superficie irrigada se incrementó a 3850 ha y los sistemas de cultivo se diversificaron con el desarrollo de los dos ciclos. Así en invierno-primavera se producía maíz para elote, chile, jitomate y tomate; en verano-otoño, maíz para elote, chile, jitomate y tomate. En ambos ciclos, las variedades hortícolas ya eran mejoradas, con mayor requerimiento de agua que las criollas, más frutales (naranja Valencia y mandarina) y forrajes (alfalfa y sorgo). La extracción de agua de los acuíferos superficial y profundo era de unos 46.20 millones de m^3 año⁻¹, lo cual ya superaba en 5.4 % la recarga

Cuadro 2. Evolución reciente de la agricultura de riego en la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México

Año	Superficie irrigada (ha)	Sistema de cultivo
1950	---	Temporal: maíz para grano, cacahuate, garbanzo, frijol y calabaza
1970	2300	Riego (primavera-verano): maíz para grano, chile y jitomate. Temporal (otoño-invierno): maíz para grano, frijol, cacahuate y garbanzo
1994	3850	Riego. Invierno-primavera: maíz para elote, chile, jitomate y tomate; verano-otoño: maíz para elote y chile; frutales: naranja y mandarina; forrajes: alfalfa y sorgo
2003	4095	Riego. Invierno-primavera: maíz para elote, chile, jitomate, tomate y calabacita; verano-otoño: maíz para elote, chile y jitomate; frutales: naranja y mandarina; forrajes: alfalfa y sorgo

Fuente: DGE (1930); Acosta (1934); DGE (1957); Martínez, (1970); DGE (1975); INEGI (1994); Charcas, (2000); Ballín (2003).

(INEGI, 1994; Charcas, 2000).

3.3.2.3 *Situación actual.* La superficie bajo riego es de 4235 ha; los cultivos anuales de invierno-primavera son chile, jitomate, tomate y calabacita y de verano-otoño es el maíz para elote principalmente, con predominio de variedades mejoradas; persisten los frutales (naranja y mandarina) y forrajes (alfalfa y sorgo). La aplicación del agua y nutrientes es mediante riego por goteo a maíz para elote y hortalizas, y microaspersión a frutales, y por gravedad a maíz y frutales cultivados en surcos y amelgas. La extracción es alrededor de 49.14 millones de m^3 año⁻¹, por lo que se supera en 12.1 % la recarga (Ballín, 2003).

Así, en el periodo de 1950 a 1970 la superficie irrigada y el patrón de cultivos representó una extracción menor que el volumen de recarga local, lo cual significaba la posibilidad de un aprovechamiento adicional de 31.84 millones de m^3 . En el periodo de 1970 a 1994, el incremento en la superficie bajo riego y la transformación del patrón de cultivos significó cambios importantes en la relación recarga-extracción, lo cual generó un déficit de 5.3 millones de m^3 . Actualmente, la incorporación de variedades mejoradas de alto rendimiento, adaptadas al riego presurizado, han acentuado el déficit en la recarga-extracción en 34.82 millones de m^3 año⁻¹.

Estos resultados concuerdan con lo que ha sucedido en la costa de Hermosillo, Sonora, donde en 1965 la superficie irrigada era de 110 mil ha, con un patrón de cultivos conformado por una rotación de algodón y

trigo; para 1995, la superficie irrigada tuvo que disminuir a 72 mil ha, y el patrón de cultivos se diversificó e incluyó frutales (vid, cítricos, nogal, y manzano), forrajes (alfalfa), así como cultivos anuales (trigo, algodón, maíz y garbanzo) (Jiménez, 1965; Jardines, 1976; Ayala *et al.*, 2002; Silva 2005). En la región Lagunera, en 1940 el principal cultivo era el algodón; actualmente, el cultivo dominante es la alfalfa (ocupa cerca del 40 % de la superficie total), seguido de maíz forrajero, vid, algodón y sorgo forrajero (Cruz y Levine, 1998).

3.3.3 Encuesta a los agricultores propietarios de pozos

En el cuadro 3 se muestra la caracterización general del área de estudio con base en la información recopilada de los agricultores encuestados. Enseguida se destacan y discuten otros aspectos de la información obtenida por medio de la encuesta practicada.

Tenencia de la tierra. En el área bajo estudio predomina la tenencia ejidal a través de los ejidos de El Jabalí, El Refugio, Las Adjuntas, Cieneguilla, San Martín, San Diego, La Loma, El Pescadito y El Aguacate. Las pequeñas propiedades están localizadas en la margen izquierda del río Verde. La extensión de la parcela ejidal, hasta antes de la nueva Ley Agraria publicada en el Diario Oficial de la Federación el 26 de febrero de 1992, fue de alrededor de 6 ha. A partir de esta fecha se inició un proceso de compra-venta de parcelas de manera que cuando se realizó la encuesta, el 71% de los agricultores estudiados contaba con una superficie mayor que 8 ha, es decir mayor a la

Cuadro 3. Caracterización general de la agricultura de riego en la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México, con base en una encuesta a 85 agricultores propietarios de pozos

Superficie (ha)	Frecuencia	Características del pozo			Área por tipo de riego (%)			Área por tipo de cultivos (%)		
		Caudal (Ls ⁻¹) promedio	Bomba turbina vertical (%)	Gravedad	Microaspersión	Goteo	Maíz	Hortalizas	Naranja	
1 - 7	25	10	88	53	38	9	20	17	63	
8 - 14	42	15	54	46	35	19	11	9	80	
15 - 21	14	18	78	46	45	9	18	21	62	
22 - 28	4	26	50	4	68	29	9	0	91	

dotación original (cuadro 3). Lo anterior indica que se está dando un proceso de concentración de la tierra y el agua en los ejidos donde se localiza el área bajo estudio. Las pequeñas propiedades son pocas y de una extensión promedio de 25 ha.

Patrón de cultivos. En el área de estudio se producen cultivos perennes y anuales. Los perennes son la naranja Valenciana y la mandarina; los anuales son maíz para elote, jitomate, chile, tomate y calabacita. En la naranja Valenciana y la mandarina se invierten las ganancias que se obtienen en las hortalizas, pues se considera que dan estabilidad y seguridad a la economía de la unidad de producción; contrariamente, las hortalizas son cultivos muy rentables, pero muy riesgosos. El maíz para elote permite recuperar parte de la inversión que se hace en el sistema de riego y en la aplicación de fertilizantes a las hortalizas, por lo que contribuye también a reducir costos y dar seguridad a la producción.

Con la encuesta se registraron dos patrones de cultivo: naranja, maíz y hortaliza, y naranja, hortaliza y maíz. En ambos patrones, lo que varía es la superficie que se dedica a cada cultivo y la magnitud de la inversión en insumos. Los agricultores que disponen de menor superficie (clase 1 a 7 ha), utilizan un patrón de naranja, maíz y hortalizas; por el contrario, los que cuentan con mayor superficie (clase 22 a 28 ha) tienen un patrón de naranja, hortalizas y maíz; y los que tienen una superficie intermedia (clase 15 a 21 ha) utilizan ambos

patrones de cultivo (cuadro 3). En general, los agricultores que tienen éxito en las hortalizas durante una o más temporadas, invierten las ganancias en el establecimiento o compra de una huerta de cítricos, con lo cual tratan de dar estabilidad y certidumbre a su unidad de producción familiar.

Pozos y equipo de bombeo. Las características de los pozos y el equipo de bombeo varían según la disponibilidad de tierra de los agricultores; así, los que cuentan con menos de 8 ha tienen pozos con alrededor de 53 m de profundidad, caudales de 10 L s^{-1} y bombas predominantemente de turbina vertical; los que disponen de más de 22 ha poseen pozos de 137 m, caudales de 26 L s^{-1} y bombas de turbina vertical y sumergibles (cuadro 3). La profundidad del pozo y el equipo de bombeo son indicadores del volumen de extracción y de su costo; por tanto, el reemplazo de las bombas de turbina vertical por las sumergibles obedece básicamente a costos de extracción, de mantenimiento y reparación.

Sistemas de riego. La aplicación del agua se realiza mediante riego por gravedad y presurizado. Los agricultores que disponen de superficies menores que 22 ha utilizan tanto riego por gravedad como presurizado, mientras que los que poseen entre 22 y 28 ha usan predominantemente el riego presurizado. El reemplazo del riego por gravedad por el presurizado se debe a que este último permite regar mayor superficie con el mismo volumen, hacer una aplicación eficiente

y oportuna del agua y nutrientes y reducir las necesidades de mano de obra, entre otros. Sin embargo la sustitución de semillas criollas por mejoradas implica una intensificación total del cultivo (mayor densidad de población, fertilización y requerimiento de agua) y al final una mayor extracción del acuífero.

3.3.4 Caracterización de los agricultores propietarios de pozos mediante su ordenación con componentes principales y su clasificación con el TWISPAN

3.3.4.1 Ordenación

Los resultados de la ordenación indican que los primeros tres ejes de ordenación o componentes principales explicaron el 57.8% de la variación total (cuadro 4); el primero de ellos resume 27.7% y los atributos con mayor peso son superficie regada con microaspersión (Hamicro), superficie con naranja (Sperenn) y caudal del pozo (Caudal); el segundo componente resume 15.8% de la variación y los atributos con mayor peso son superficie regada por gravedad (Hagrave) y superficie con maíz (Ha_M); el tercero explica 14.3% de la variación y los atributos con mayor peso son la superficie con riego por goteo (Hagoteo) y superficie con hortalizas (Shorta).

En la figura 8 se presenta el ordenamiento sobre los primeros dos componentes principales de los agricultores propietarios de pozos con base en las 10 variables estudiadas. La disposición de los agricultores sobre el primer componente corresponde a un gradiente de aplicación

Cuadro 4. Importancia relativa de las diez variables de la agricultura de riego en la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México, dentro de los tres primeros componentes principales

Variables	CP1 (27.7)*	CP2 (15.8)*	CP3 (14.3)*
ProfPozo	-0.3692	-0.1126	-0.1171
Medidor	-0.2126	0.3291	0.3031
Tbomba	0.1600	0.1666	0.2682
Hagrave	0.2722	-0.5933	0.2131
Hamico	-0.5256	-0.0067	0.0067
Hagoteo	0.0247	0.1272	-0.6986
Sperenn	-0.4583	-0.3338	0.1082
Shorta	0.0651	-0.2988	-0.5113
Ha_M	0.2176	-0.4490	0.1261
Caudal	-0.4246	-0.2843	0.0081

* Porcentaje de variación explicada por cada componente principal

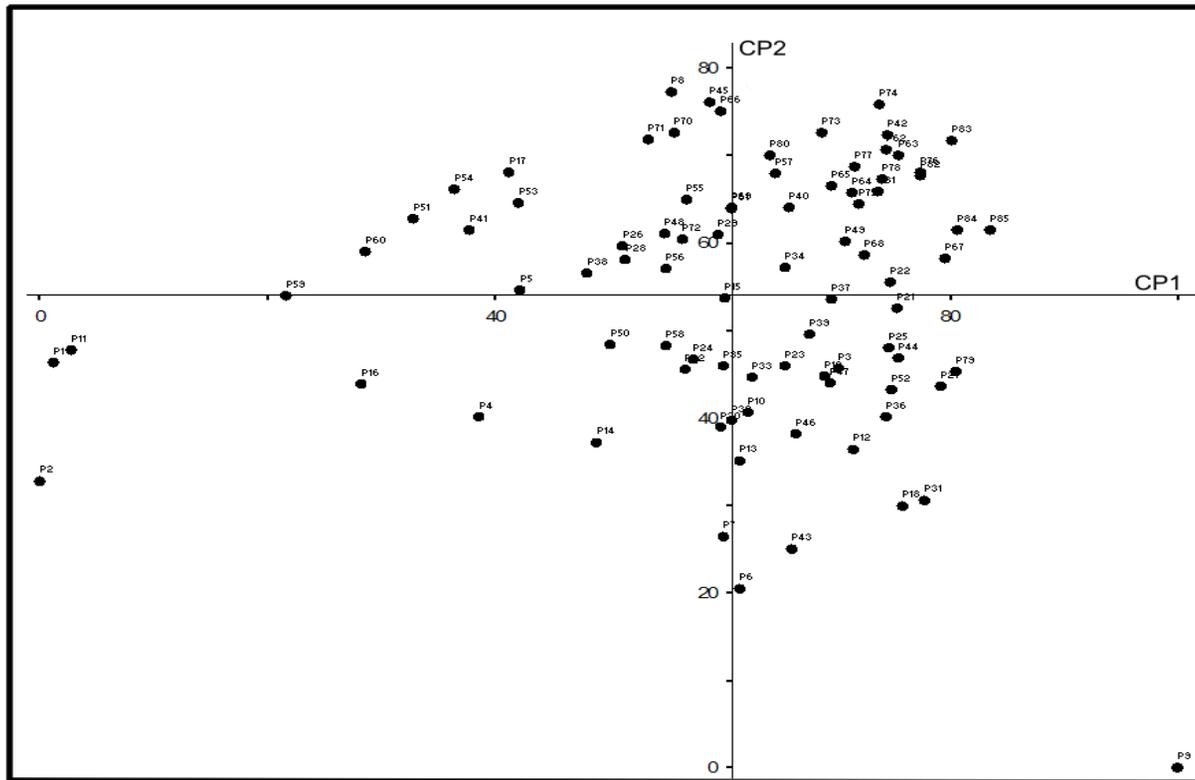


Figura 8. Ordenación de 85 agricultores y diez variables de la agricultura de riego en la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México, sobre los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2)

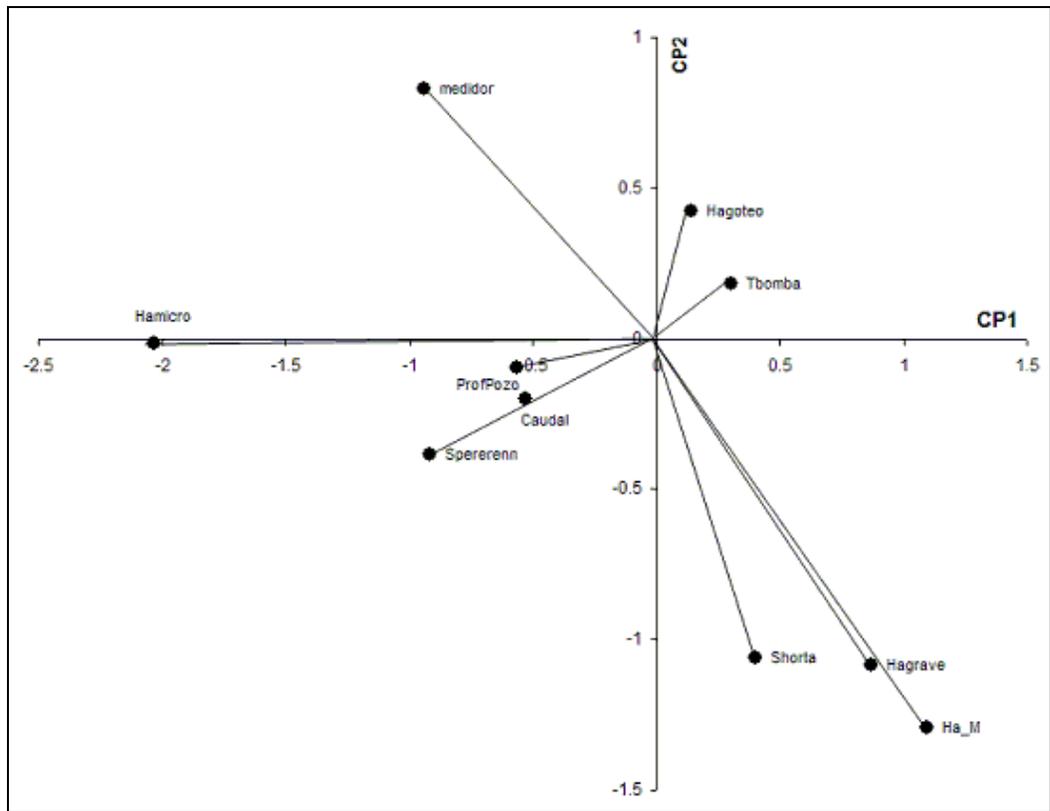


Figura 9. Ordenación de las diez variables de la agricultura de riego en la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México, sobre los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) (Hagrave: superficie irrigada por gravedad; Hamicro: superficie irrigada por microaspersión; Ha: superficie irrigada por goteo; Tbomba: tipo de bomba; ProfPozo: profundidad del pozo; Sperenn: superficie con naranja; Shorta: superficie con hortalizas; Ha_M: superficie con maíz)

del agua, patrón de cultivos perennes y caudal del pozo.

Por ejemplo, los agricultores con claves P11, P1, P59, cuentan con riego por microaspersión en superficies mayores con cítricos y extraen mayor cantidad de agua, mientras que los agricultores con las claves P31 y P18 utilizan riego por gravedad en superficies menores con cítricos y extraen menor cantidad de agua. En el segundo componente, la ordenación de los agricultores se ajusta a un gradiente de aplicación del agua y producción de cultivos anuales. Por ejemplo los agricultores P9 y P16, aplican riego por gravedad en superficies mayores con maíz, pero los agricultores P8 y P66 utilizan riego por goteo en superficies menores de hortalizas. Con base en la aplicación del agua, el caudal del pozo y el patrón de cultivos, obtenidos anteriormente y la caracterización general de la agricultura de riego (Cuadro 3), los agricultores con valores más altos en las variables superficie regada con microaspersión (68%), superficie con naranja (91%) y caudal promedio del pozo (26 L s^{-1}), son los que tienen superficies irrigadas entre 22 y 28 ha. En contraste, los agricultores con valores más altos en las variables superficie regada por gravedad (53%) y superficie con maíz (20%) son quienes sólo cuentan con superficie regada entre 1 y 7 hectáreas.

En la figura 9 se presentan las relaciones que guardan las variables consideradas con los dos primeros componentes. Se observa que superficie regada con microaspersión, superficie con naranja y caudal

están más relacionados con el primer componente principal (CP1). Como la variable superficie regada con microaspersión tiene el mayor peso y el vector con mayor magnitud puede caracterizar por si misma a todos los agricultores. Por otra parte, las variables superficie con maíz y superficie por gravedad están mejor relacionados con el segundo componente principal (CP2); sin embargo, como superficie con maíz tuvo un peso mayor puede caracterizar mejor los agricultores que la superficie regada por gravedad.

Según los resultados de los censos de pozos (cuadro 1), los censos agrícola-ganadero (cuadro 2), la caracterización general del área de estudio (cuadro 3) y la ordenación de los agricultores, el aprovechamiento del agua de riego de la región estudiada– equipo de bombeo, infraestructura de conducción y aplicación y patrón de cultivos- se puede caracterizar apropiadamente sólo con las variables que involucran aplicación del agua y patrón de cultivos.

3.3.4.2 Clasificación

En el cuadro 5 se muestra el resultado de la clasificación obtenida mediante el TWISPAN. En el margen izquierdo están los números y acrónimos de las variables; en el derecho, aparecen los grupos de variables conformados en notación binaria, con base en los niveles jerárquicos de la clasificación; en el superior, se encuentran los números correspondientes a los agricultores encuestados; y en el inferior, los grupos de agricultores en disposición jerárquica.

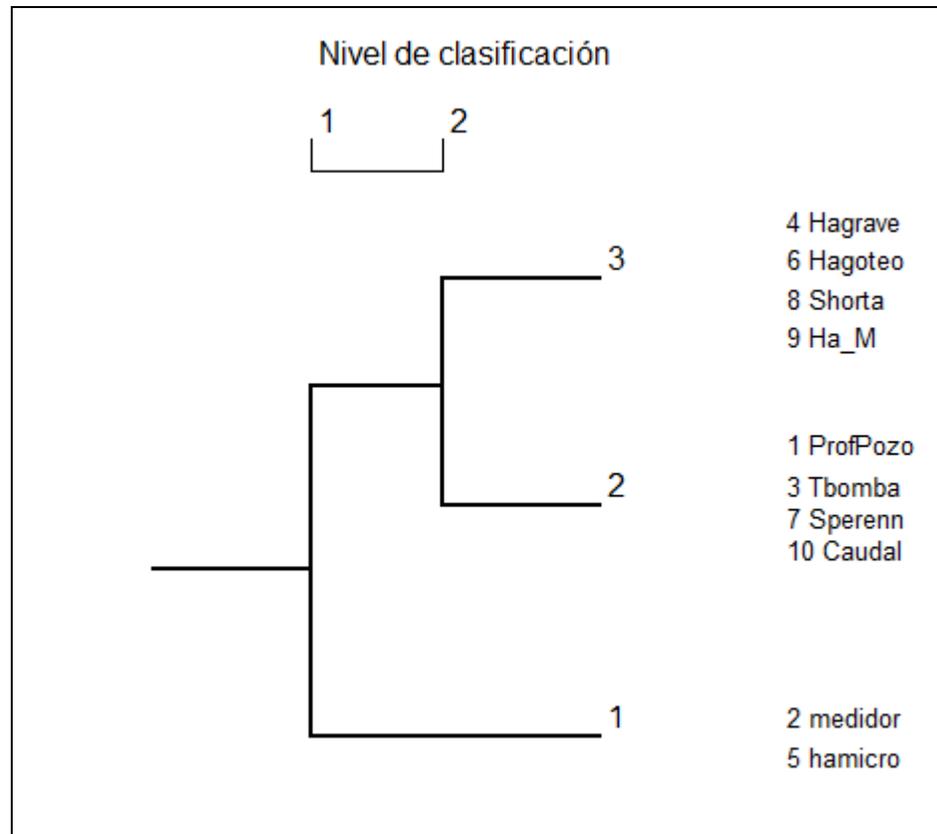


Figura 10. Clasificación mediante TWINSpan de las variables que constituyen el aprovechamiento del agua subterránea, según 85 agricultores de la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México

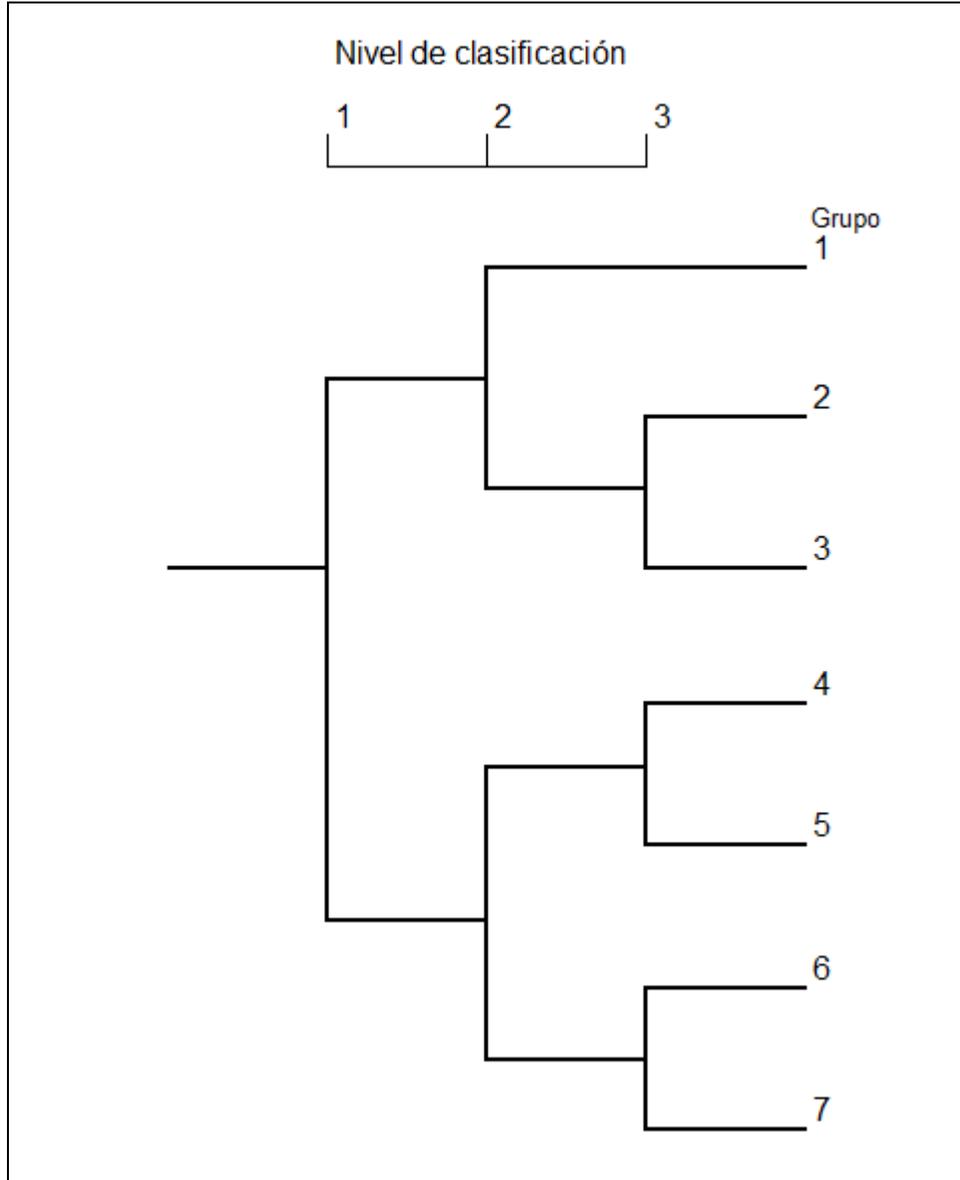


Figura 11. Clasificación mediante TWINSpan de 85 agricultores, con base en las variables que constituyen la forma de aprovechamiento del agua subterránea de la porción sur del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México.

Las variables se clasificaron en tres grupos (figura 10), los cuales se separan en dos conjuntos, que se describen a continuación: a) Conjunto primero, comprende al grupo 1 formado por las variables medidor (Medidor) y Superficie irrigada por microaspersión (Hamico), el cual quedó definido desde el nivel 1 de clasificación y se relaciona con el control en la extracción del acuífero y la aplicación del agua. b) Conjunto segundo, integrado por dos grupos: i) el primero (grupo 3) consta de las variables Superficie irrigada por gravedad (Hagrave), Superficie irrigada por goteo (Hagoteo), Superficie con hortalizas (Shorta) y Superficie con maíz (Ha_M), delimitado en el nivel 2 de clasificación y vinculado a la aplicación del agua y al patrón de cultivos; ii) el segundo grupo (grupo 2), presenta las variables Superficie con naranja (Sperenn), Caudal (Caudal), Tipo de bomba (Tbomba) y Profundidad del pozo (ProfPozo), y está relacionado con la eficiencia en la extracción y requerimiento de agua.

Los 85 agricultores encuestados se clasificaron en siete grupos (figura 11), los cuales se pueden reconocer en dos conjuntos, en los que el medidor (Medidor) como variable indicadora o determinante de su separación. A continuación se describen ambos conjuntos: a) El conjunto primero comprende a todos los agricultores que tienen medidor instalado, y da lugar a dos subconjuntos: i) subconjunto primero, formado solamente por el grupo 1 integrado con cinco agricultores (P60, P59, P51, P11, P2 y P1), con Superficie irrigada por

microaspersión (Hamico) y Caudal (Caudal) como variables indicadoras, pues estos agricultores tienen mayor superficie bajo microaspersión y extraen un mayor volumen de agua; ii) subconjunto segundo, con Tipo de bomba (Tbomba) como variable indicadora, comprende dos grupos, el primero (grupo 2) formado por cuatro agricultores (P53, P41, P24 y P7), utiliza bomba sumergible para resolver problemas de operación debido a la mayor profundidad de los pozos; y el segundo (grupo 3), constituido por 15 agricultores que utiliza bomba de turbina debido a que la profundidad de los pozos es menor.

b) Conjunto segundo; todos los agricultores de este conjunto carecen de medidor, y se integra por dos subconjuntos: i) Subconjunto primero, con Superficie irrigada por goteo (Hagoteo), Superficie irrigada por microaspersión (Hamico), Superficie con naranja (Sperenn), Tipo de bomba (Tbomba) como variables indicadoras, incluye dos grupos. El primero (grupo 4), abarca tres agricultores (P42, P55 y P57) que se distinguen por poseer huertas de cítricos y hortalizas con riego presurizado y extraen el agua con bombas de turbina; el segundo (grupo 5), comprende 11 individuos que se caracterizan por cultivar huertas de cítricos y hortalizas con riego presurizado, pero extraen el agua con bombas sumergibles. ii) Subconjunto segundo, con Tipo de bomba (Tbomba) como variable indicadora, comprende dos grupos, el primero (grupo 6), formado por 38 agricultores, utiliza bombas de turbina para la extracción del agua; y el segundo (grupo 7), formado por

ocho personas (P9, P6, P19, P20, P30, P43, P46 y P79), utiliza bombas sumergibles.

Los resultados de la clasificación indican que los agricultores propietarios de pozos se diferencian por la adopción de normas que regulan la extracción y aplicación del agua (asignación de volumen y periodo concesionado); asimismo, por la implementación de tecnologías para la extracción y aplicación eficiente del agua (motores y bombas más eficientes y riego presurizado); y finalmente por la conformación de patrones de cultivos más demandantes de agua, pero más rentables.

Conclusiones

El área de estudio comprende porciones de dos acuíferos: i) *superficial*, de tipo granular, en un sustrato de origen ígneo y calizo, con aguas de los grupos geoquímicos bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas; ii) *profundo*, en rocas calizas de la formación El Doctor, en ambiente cárstico, a profundidad de 250 metros, con aguas del grupo geoquímico sulfatadas cálcicas. El uso de las aguas del acuífero superficial en suelos Phaeozems háplicos (PHh) ha permitido transformar en regadío prácticamente toda el área de temporal de la porción sur del valle de Rioverde; asimismo, conformar patrones de cultivo que incluyen cítricos, hortalizas y maíz, que proporcionan seguridad y rentabilidad alta al agricultor.

El aprovechamiento del acuífero superficial durante más de cincuenta años, aunado a un incremento en la superficie de riego, patrones de cultivo muy demandantes de agua y a métodos de extracción y aplicación del agua muy eficientes, ha provocado un desequilibrio permanente en el ciclo de recarga-extracción anual, y el aprovechamiento del acuífero profundo, por lo cual se está corriendo el riesgo de que se reduzca la producción agrícola así como el ensalitramiento de los suelos.

Con respecto al abatimiento del acuífero superficial se han tomado medidas legales y administrativas, sin embargo han sido ineficaces debido a que están orientadas a asignar volúmenes de extracción con base en la superficie irrigada y requerimiento del cultivo, sin considerar el volumen disponible del acuífero; asimismo, dichas medidas requieren ser complementadas con prácticas de manejo que incluyan la protección del área de recarga y la monitorización sistemática del acuífero.

Las características generales del aprovechamiento del agua freática, al sur del valle corresponde, a la aplicación del agua, asociada a los sistemas de riego presurizado (Goteo y microaspersión) y por gravedad; y al patrón de cultivos (naranja, maíz y hortaliza, y naranja, hortaliza y maíz)

La reacción de los propietarios de pozos al abatimiento del acuífero superficial, se caracteriza por una aceptación paulatina de medidores

para controlar la extracción de cada pozo, también en la instalación de sistemas de riego más eficientes; sin embargo, según sus posibilidades económicas, combinan el aprovechamiento del acuífero superficial con el profundo mediante la profundización de los pozos y mejora del equipo de bombeo, con el consecuente incremento en la extracción de agua de ambos acuíferos.

Con base en lo anterior, se acepta la hipótesis: el análisis de los sistemas agrícolas y su respectiva infraestructura hidráulica permite reconocer y jerarquizar sus factores limitativos, por lo que es posible explicar el aprovechamiento acelerado del agua subterránea.

Literatura citada

Acosta P., R., El valle agrícola y agrario de Río Verde, S.L.P., 1934, 44 pp.

Alvarado A. R., *Estudio geohidrológico de la cuenca del río Verde, estado de San Luis Potosí*, trabajo recepcional, escuela de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, 1973, 40 pp.

Ayala G. G, R. Rodríguez H y F. Pérez G., Impacto de la agricultura en la sobreexplotación del acuífero “Costa de Hermosillo”, *Memorias del XVII Congreso Nacional de Hidráulica (AMH)*, vol. 9, Monterrey, N.L., México, 2002, pp. 409-414.

Ballín C. J. R., *Caracterización y manejo del hidrosistema de la región agrícola de Rioverde*, tesis de maestría en Hidrosistemas,

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, 2003, 160 pp.

Campos A., F. D., Análisis agro-climático preliminar del estado de San Luis Potosí, Agrociencia, Enero-marzo de 1993, Vol 4, núm. 2, pp 19-43.

CETENAL, Carta edafológica, escala 1:50000, hojas Angostura F-14-A-86, San Francisco F-14-A-87, El Refugio F-14-C-16 y Rioverde F-14-C-17, 1973.

CNA, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, : Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Ríoverde, estado de San Luis Potosí, 2002, 25 pp.

Cruz A. y G. Levine, El uso de las aguas subterráneas en el Distrito de Riego 017, Región Lagunera, México, IWMI, Serie Latinoamericana No. 3. México, D.F., México: Instituto Internacional del Manejo del Agua, 1998, 31 pp. Disponible en Internet:http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Latin_American_Series/pdf/3.pdf [Consulta: 2 abril 2008]

Charcas S., H., J. R. Aguirre R y E. Olivares S., Proceso de conformación agrícola de la región de Rioverde, San Luis Potosí, México, Geográfica, núm. 128, julio-diciembre, 2000, pp. 105-117.

Charcas S., H., E. Olivares S. y J. R. Aguirre R., Agua de riego en la región de Rioverde, San Luis Potosí, México, Ingeniería

Hidráulica en México, Vol. XVII, núm. 4, octubre-diciembre, 2002, pp. 37-56.

Charcas S., H., *Proceso de conformación y caracterización actual de la región agrícola de Rioverde, San Luis Potosí, México*, tesis de doctorado en Ciencias agrícolas, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Marín, Nuevo León, 2002, 173 pp.

DGE, Primer Censo Agrícola-Ganadero, San Luis Potosí, México, D.F., 1930, 131pp.

DGE, Primer Censo Agrícola-Ganadero y Ejidal 1950, San Luis Potosí, México, D.F., 1957, 320 pp.

DGE, V Censos Agrícola Ganadero y Ejidal 1970, San Luis Potosí, México, 1975, 300 pp.

FAO-UNESCO, Mapa mundial de suelos leyenda revisada Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos 60 FAO, Roma Italia, 1991, 142 pp.

Flores F., J.L. y R.I. Yeaton H., La importancia de la competencia en la organización de las comunidades vegetales en el altiplano mexicano, INTERCIENCIA, Vol. 25, núm. 8, 2000, pp. 365-371.

García, E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen, México, 1988, 217 pp.

HIDROTEC, Informe del estudio geohidrológico preliminar en la zona de Ríoverde, S.L.P. Tomo I, 1972, 181 pp.

- Hiltbrunner J., P. Jeanneret, M. Liedgens, P. Stamp y B. Streit.,
Response of weed communities to legume living mulches in
winter wheat. *Agronomy and Crop Science*, Vol. 193, 2007, pp.
93-102.
- Höft, M., S. K. Barik, y A. M. Lykke, Quantitative ethnobotany.
Applications of multivariate analyses in ethnobotany. *People and
Plants working paper 6*. UNESCO, Paris. 1999, 46 pp.
- INEGI, *Síntesis geográfica del estado de San Luis Potosí*, México, D.F.,
1985, 186 pp.
- INEGI, *San Luis Potosí. Resultados definitivos. VII. Censo agrícola-
ganadero*, tomo I, México, D.F., 1994, 505 pp.
- INEGI, Carta topográfica, escala 1:50000, hojas El Refugio F-14-C-16,
2001 a.
- INEGI, *San Luis Potosí. Resultados definitivos. XII Censo general de
población y vivienda 2000, Principales resultados por localidad*,
México, D.F., 2001 b, 360 pp.
- INEGI, Estudio hidrológico del Estado de San Luis Potosí, México, D.F.,
2002, 136 pp.
- INEGI, Carta hidrológica de aguas superficiales, escala 1:250000, hoja
Guanajuato F-14-7, segunda impresión 2003.
- INEGI, *Anuario estadístico del estado de San Luis Potosí*, tomo I,
México, D.F., 2006, 498 pp.

- Labarthe, G., M. Tristán, A. Aguillón, L. S. Jiménez y A. Romero, Cartografía geológica 1:50 000 de las hojas El Refugio y Mineral El Realito, estados de San Luis Potosí y Guanajuato, Folleto técnico, núm. 112, Instituto de Geología, UASLP. San Luis Potosí, 1989, 76 pp.
- Jiménez V., A., Condiciones de las Aguas Subterráneas en el Distrito de Riego número 51. Costa de Hermosillo Son, Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XIX, núm. 3, 1965, pp. 65-81.
- Jardines M., J.L., Los Distritos de Riego por Bombeo del Centro y Norte de Sonora, Recursos Hidráulicos, Vol. V, núm. 1, 1976, pp. 8-25.
- McCune, B. y M. J. Mefford, PC-ORD. Multivariate analysis of ecological data, version 4. MjM Software Design, Gleneden Beach, Oregon USA. 1999, 237 pp.
- México. Nueva Ley Agraria, de 26 de febrero de 1992, Diario Oficial de la Federación, 40 pp.
- Martínez, J., *Proyecto de organización económica del ejido El Refugio*, tesis profesional, Escuela de Economía, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, 1970, 57 pp.
- Montañas, A., *Hidrogeoquímica del municipio de Rioverde, San Luis Potosí*, trabajo recepcional, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, 1992, 91 pp.
- Namakforoosh, M.N., Metodología de la investigación, Limusa, segunda edición, México, 2000, 525 pp.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, Diario Oficial de la Federación, 18 de Enero de 1996.

Obregón, M. B., LA IRRIGACIÓN: Por medio de presas, canales, avenamientos y pozos artesianos, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, segunda edición, 1923, 128 pp.

Paredes, T., Estudio hidrológico de la región de Rioverde y Arroyo Seco, en los estados de San Luis Potosí y Querétaro, 1909, 47 pp.

Perales, H., *Conservation and evolution of Maize in Amecameca and Cuatla valleys of México*. Ph.D. dissertation. University of California. Davis, California, 1998, 350 pp.

PROYESCO, *Trabajos complementarios del estudio geohidrológico de la zona de Ríoverde, S.L.P.* Tomo I, 1980, 96 pp.

Rzedowski, J., Vegetación del estado de San Luis Potosí, Acta Científica Potosina, Vol. V Nos. 1 y 2, 1965, IIZD Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí., 1966, 291 pp.

SARH, *Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de San Ciro, San Luis Potosí*, Geohidrología Mexicana, S.A., contrato GZA-79-42-ED, SARH. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica. Dirección General

de Programas de Infraestructura Hidráulica, Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, México, D.F., 1979, (sp).

SRH, *Inventario de aprovechamientos superficiales y subterráneos para riego. San Luis Potosí*, Irrigación y Control de Ríos, Dirección de Pequeña Irrigación, Secretaría de Recursos Hidráulicos, México, 1966, 117 pp.

Silva L. H., Evaluación del impacto producido por actividades antropogénicas en acuíferos costeros de zonas áridas: Costa de Hermosillo, Sonora, tesis profesional, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, 2005, 165 pp.

ter Braak CJF, CANOCO – a FORTRAN program for Canonical Community Ordination Ordination Version 2.1, Ithaca New York, 1999, 94 pp.

4 Discusión general

En la introducción general se señalaron los objetivos, y las hipótesis correspondientes; asimismo, se presentaron los dos trabajos de investigación que permitieron probar cada una de las hipótesis.

Con base en los trabajos precedentes, se hacen las siguientes consideraciones:

1.- El estado del conocimiento y el historial de aprovechamiento del agua subterránea en la llanura de Rioverde, conformado por el valle de Cerritos-Villa Juárez (Guaxcamá) y por el valle de Rioverde presentan las características siguientes:

a) Valle de Cerritos Villa Juárez (Guaxcamá), las aguas subterráneas están localizadas en dos acuíferos; el primero, superficial, en materiales sedimentarios calizos e ígneos, con una extracción estimada de 5.70 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$; el segundo, profundo, en rocas calizas de la formación El Doctor y yesos de la formación Guaxcamá, con una extracción estimada en 0.40 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$. En este valle brotan nueve manantiales, entre los que destaca Puerta del Río. De acuerdo

con la hidrogeología de los acuíferos superficial y profundo, ambos se consideran con extracción menor a la recarga. Las calidades de las aguas del acuífero superficial corresponden a los grupos geoquímicos bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas, y las del profundo a sulfatadas cálcicas. Con base en sus características físicas y químicas, las aguas del acuífero superficial son apropiadas para uso agrícola y doméstico, y las del profundo sólo para uso agrícola. La extracción del agua se realiza mediante 108 pozos profundos, los principales tipos de usos son: I) Agrícola, con alrededor de 104 pozos profundos, los cuales representan aproximadamente un 96%, para un regadío de 1334 ha, en donde se produce maíz para grano intercalado con frijol, en rotación con chile y jitomate. II) Doméstico, con aproximadamente cuatro pozos profundos, los cuales representan el 4% restante, para una población rural y urbana de 32000 habitantes, la cual ha propiciado una conurbación en los alrededores de las ciudades de Cerritos y Villa Juárez y de pequeños asentamientos humanos dispersos (SRH, 1973; CNA, 1983; INEGI, 1994; INEGI, 2002; INEGI, 2006).

ii) Rioverde, las aguas subterráneas se encuentran en dos acuíferos, el primero, superficial, constituido por materiales ígneos y sedimentarios, con una extracción estimada de 74 millones de m^3 año⁻¹; el segundo, profundo, en rocas calizas de la formación El Doctor. En este valle brotan 20 manantiales, entre los que destaca la Media Luna con un caudal de $4.0 m^3 s^{-1}$. De acuerdo con la hidrogeología del acuífero

superficial, se considera que su extracción es mayor a la recarga, y para el profundo, que la extracción es menor a la recarga (SARH, 1979; Charcas *et al.*, 2002; INEGI, 2002). La calidad del agua del acuífero superficial corresponde principalmente al grupo bicarbonatadas cálcicas, apropiadas para uso agrícola y doméstico; la del acuífero profundo pertenece al grupo sulfatada cálcica, apropiada sólo para uso agrícola. La extracción del agua se realiza mediante 1271 pozos, los principales usos son: i) Agrícola, con alrededor de 1250 pozos, los cuales representan aproximadamente un 98% del total, para un regadío de 7000 ha, con producción principalmente de maíz para elote en rotación con jitomate, chile, tomate y calabacita, como cultivos anuales, y la naranja, mandarina y alfalfa, como cultivos perennes (SRH, 1973; Charcas, 2002). II) Doméstico, con aproximadamente 21 pozos profundos, los cuales representan el 2% restante, para una población urbana y rural de 120000 habitantes asentada en una conurbación formada por las ciudades de Rioverde, Ciudad Fernández y El Refugio, y pequeñas comunidades dispersas (TACSA, 1996; SEGAM, 2000).

Así, se confirmó la primera hipótesis y se estableció que el mayor aprovechamiento del agua subterránea de la llanura de Rioverde, ocurre en su zona sur (valle de Rioverde), la cual fue estudiada en la siguiente parte.

2.- En el valle de Rioverde, el aprovechamiento del agua subterránea se caracteriza por: i) aplicación del agua asociada a los sistemas de

riego presurizado (goteo y microaspersión) y por gravedad a través de surcos y amelgas; ii) patrón de cultivos de naranja, maíz y hortaliza, y de naranja, hortaliza y maíz. Asimismo, los agricultores propietarios de pozos, se agrupan de acuerdo con: a) la adopción de normas que regulan la extracción y aplicación del agua (asignación de volumen y periodo concesionado); b) por la implementación de tecnologías para la extracción y aplicación eficiente del agua (motores y bombas más eficientes y riego presurizado); y c) finalmente por la conformación de patrones de cultivos más demandantes de agua, pero más rentables. Con base en lo anterior no se rechazó la segunda hipótesis.

De acuerdo con los resultados anteriores se estuvo en posibilidad de proponer acciones para conformar una estrategia de aprovechamiento racional del acuífero superficial:

- a) Estudio estadístico de la dinámica del acuífero, sus parámetros hidráulicos y el efecto de la densidad y ubicación de los pozos.
- b) Evaluación de la recarga natural efectiva, así como la posibilidad de la recarga artificial.
- c) Predicción de la demanda de agua a corto, mediano y largo plazo.
- d) Mejoramiento de la eficiencia de trabajo de los equipos de bombeo.
- e) Utilización en conjunto de las aguas superficiales y subterráneas.

- f) Instalación de sistemas de riego presurizado, sobre todo en las zonas de mayor profundidad del nivel freático.
- g) Instalación de medidores en todos los pozos.
- h) Permuta de las aguas residuales previamente depuradas.
- i) Reglamentación para recuperar y conservar el equilibrio entre la recarga y la extracción.
- j) Plan de trabajo general para recobrar y mantener el equilibrio del acuífero.

Algunas de estas acciones propuestas ya se han aplicado anteriormente en otros estados de México y del mundo.

El manejo adecuado y eficiente del agua subterránea requiere del análisis hidrogeológico, geofísico, de la hidráulica del acuífero y de los pozos, con el fin de determinar la capacidad de almacenamiento del acuífero, el espaciamiento óptimo entre pozos, el gasto óptimo de extracción, y el movimiento de los flujos, entre otros. Cabe señalarse ya que casi 100 millones de habitantes en México dependen del agua subterránea para el uso doméstico, pero también el agua es un recurso vital para los sectores agrícola e industrial de la economía nacional y de la región y desempeña un papel vital en la conservación de ríos, lagos, humedales y otros sistemas acuáticos naturales.

La recarga artificial es reconocida como una de las estrategias más importantes, ya que puede revertir el descenso de los niveles freáticos de una manera rápida. La recarga artificial, incluye diversos métodos,

pero los más ampliamente utilizados son las zanjas y drenes; sin embargo, acciones como la reforestación, la conservación de la vegetación nativa, o el manejo de la escorrentía, son escasamente utilizadas. Actualmente la recolección de agua de lluvia en las zonas urbanas, permite disponer de cierta cantidad de agua, la cual puede destinarse hacia la recarga de los acuíferos; sin embargo, es posible que en el proceso de recolección se agregue algún tipo de contaminante, por lo que se debe elegir cuidadosamente el sitio de recarga específico, donde se puedan evitar contaminaciones por bacterias o por elementos tóxicos (Sakthivadivel y Chawla, 2002; Kumar y Kumar, 2002).

El conocimiento de la demanda de agua a futuro, permite conocer la extracción total del agua, por lo que es posible plantear escenarios como el realizado para la ciudad de Delhi en la India, en el cual se muestra la demanda de agua a futuro, por lo que si se sigue extrayendo de acuerdo con el ritmo de crecimiento de las ciudades y zonas agrícolas, las reservas para esta ciudad se agotarán en el año 2015, y en otras ciudades de la India las reservas se agotarán en el año 2025. En México, el acuífero que sostiene al millón y medio de personas que habitan la región semi-árida de Ciudad Juárez-El Paso se está aprovechando con extracciones mucho mayores a su recarga, por lo que se prevé su agotamiento en 20 años (U.S.-México Foundation for Science, 1998; Kumar y Kumar, 2002).

El mejoramiento de la eficiencia en los equipos de bombeo, implica la reducción de la potencia instalada, de manera que disminuye el consumo energético y por tanto los costos de producción. El mejoramiento en la eficiencia electromecánica, junto con la tecnificación de la conducción y aplicación del agua en las zonas agrícolas, tanto en México como en la India, es una de las estrategias más ampliamente utilizadas para reducir el abatimiento de los acuíferos. Sin embargo, el incremento en la productividad por la tecnificación de cultivos como el maíz para grano, es bajo (alrededor del 5.6%), por lo que se origina un cambio en el patrón de cultivos, con el fin de obtener mayores utilidades; esto ocasiona una mayor extracción que en ocasiones excede el volumen concesionado (de la Cruz y Peña, 1994; Marañón y Wester, 2000; Scott y Shah, 2004)

El uso combinado de las aguas superficiales y subterráneas se ha aplicado durante muchos años; sin embargo su aplicación se limitaba a un uso alternado, es decir, cuando no existía suficiente agua superficial, como en los periodos secos o durante sequías, se recurría a las aguas subterráneas; actualmente, el uso combinado entre las aguas superficiales y subterráneas se ha modificado, de tal manera que en periodos de gran precipitación, el agua superficial sobrante se usa para recargar artificialmente los acuíferos, y en tiempos secos, se bombean esas aguas almacenadas en los acuíferos (Llamas *et al.*, 2000; Wright y Xu, 2000).

La redistribución de las obras de captación (pozos), la instalación de medidores en la totalidad de los pozos, la instalación de sistemas de riego presurizado, y la implantación de patrones de cultivo adecuados al clima y suelo, y la aplicación de calendarios de extracciones, son el tipo de acciones con las que se espera estabilizar la extracción de agua subterránea en algunos países como Arabia Saudita, India y en los Estados Unidos, en este último particularmente en el acuífero High Plains, en el estado de Kansas (Abderrahman *et al.*, 1995; Marañón y Wester, 2000; Kumar y Kumar, 2002; Sophocleous, 2005).

En México, en el acuífero Costa de Hermosillo, al reglamentar las extracciones entre 1964 y 1967, se logró una reducción de 1100 a 872 millones de m³; a pesar de las restricciones impuestas al bombeo, el área agrícola no disminuyó, pues los agricultores tecnificaron sus prácticas agrícolas en general, adecuando longitudes de surcos, mejorando la conducción con el revestimiento de canales, y adaptando nuevos patrones de cultivos. Sin embargo, con esta disminución de la extracción la meta de alcanzar el equilibrio entre la recarga y la extracción aún quedó lejana, por lo que en 1977, después de diez años, se procedió a una nueva reglamentación que sí redujo la superficie cultivada, pues la tecnificación con sistemas de riego presurizados, representaba fuertes inversiones (Arreguín, 1998).

El tratamiento del agua residual permite su reutilización para diferentes usos, como el doméstico, el agrícola o industrial, lo cual permite la

menor extracción de los acuíferos; asimismo, posibilita los intercambios de agua tratada por agua subterránea de otras cuencas. Las aguas residuales generadas por la conurbación de las ciudades de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez, se programó que fueran tratadas y se transfirieran para uso industrial en el valle de Villa de Reyes, por consecuencia, este valle entregaría las aguas subterráneas usadas por tres industrias, para ser usadas con fines doméstico e industrial de la conurbación (Cirelli, 1999).

Dentro de los planes de trabajo para la reducción del déficit y mantener el equilibrio entre la recarga y la extracción, se han desarrollado diversas acciones: i) vigilancia sistemática sobre la dinámica del acuífero, que comprenda una monitorización sistemática de los niveles de bombeo, de las extracciones, así como de la calidad del agua; ii) identificación y propuestas de solución de los problemas entre concesionarios, así como los relacionados con la contaminación del acuífero, con el fin de desarrollar los estudios correspondientes para su posible resolución, así como la búsqueda de fuentes de abastecimiento alternas; iii) elaboración de una base de datos, con actualización permanente, de los censos de pozos, así como los datos de hidrometría, calidad del agua, parámetros hidráulicos del acuífero, y relocalizaciones de las nuevas fuentes de captación, para así tomar decisiones que mitiguen el déficit en la dinámica de los acuíferos; iv) capacitación de los productores en las técnicas de manejo eficiente del

agua; v) formulación de calendarios de extracciones, para ayudar así, a una recuperación significativa de los niveles de bombeo del agua subterránea.

Es importante mencionar, que la mayoría de las acciones propuestas anteriormente, ya han sido promovidas y aplicadas por diferentes actores, aunque algunas todavía no han sido evaluadas. También cabe señalar que la aplicación de una de estas acciones es insuficiente, pues cada una de ellas puede ser viable sólo en algunas situaciones y en otras lo puede ser parcialmente. Cada una de las acciones podrían ser una solución promisoría para ciertos problemas, lo importante es determinar en cuáles condiciones (sociales o económicas) se podrían poner en marcha y de qué forma en concreto se adoptarían y pondrían en práctica, y cómo se evaluarían para verificar su eficiencia.

4.1 Literatura citada

- Aderrahman, W.A., Energy and water in arid developing countries: Saudi Arabia, a case-study. *Water Resources Development*, Vol. 17, núm. 2, 2001, pp. 247-255.
- Aderrahman, W.A., M. Rasheeduddin, I.M. Al-Harazin, J.M. Esuflebbe. Y B. S. Eqnaibi, Impacts of management practices on groundwater conditions in the Eastern Province, Saudi Arabia. *Hydrology*, Vol. 3, núm. 4, 1995, pp. 32-44.
- Al-Sakkaf, R.A., Y. Zohou, y M.J. Hall, A strategy for controlling groundwater depletion in the Sa'dah Plain, Yemen. *Water Resources Development*, Vol. 15, núm. 3, 1999, pp. 349-365.
- CNA, Estudio geohidrológico de la zona de Cerritos y Guadalcazar, S.L.P.. San Luis Potosí, ROASA, contrato S/N, CNA. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal San Luis Potosí, México, D.F., 1983, (sp).

- Charcas S., H., E. Olivares S. y J. R. Aguirre R., Agua de riego en la región de Rioverde, San Luis Potosí, México. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XVII, núm. 4, octubre-diciembre, 2002, pp. 37-56.
- Charcas S., H., *Proceso de conformación y caracterización actual de la región agrícola de Rioverde, San Luis Potosí, México*, tesis de doctorado en Ciencias agrícolas, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Marín, Nuevo León, 2002, 173 pp.
- de la Cruz, S. y E. Peña., Method to improve water resources management in groundwater pumping areas and a case study, Water Resources Development, Vol. 10, núm. 3, 1994, pp. 329-337.
- INEGI, San Luis Potosí. Resultados definitivos. VII. Censo agrícola-ganadero, tomo I, México, 1994, 505 pp.
- INEGI, Estudio hidrológico del Estado de San Luis Potosí, México, 2002, 136 pp.
- INEGI, Anuario estadístico del estado de San Luis Potosí, tomo I, México, D.F., 2006, 498 pp.
- Llamas M.R., N. Hernández-Mora y L. Martínez C., El uso sostenible de las aguas subterráneas, Informe Técnico No.1, Serie A, Fundación Marcelino Botín. España. 2000, 52 pp.
- Marañon-Pimentel, B. y P. Wester, Respuestas institucionales para el manejo de los acuíferos en la cuenca Lerma-Chapala, México, Informe Técnico, Instituto Internacional del Manejo del Agua, Serie Latinoamericana: No. 17. México, D.F., 2000, 53 pp.
- Kumar, D.S. y A. Kumar S., Groundwater situation in India: problems and perspective. Water Resources Development, Vol. 18, núm. 4, 2002, pp. 563-580.
- Sakthivadivel R. y A.S. Chawla, Artificial recharging of river water: an experiment in Madhya Ganga canal project, India, Technical paper, Water Resources Development and Training Centre, University of Roorke, India, 2002, 22 pp.

- SARH, *Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de San Ciro, San Luis Potosí*, Geohidrología Mexicana, S.A., contrato GZA-79-42-ED, SARH. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica. Dirección General de Programas de Infraestructura Hidráulica, Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, México, D.F., 1979.
- Scott, C.A. y T. Shah, Groundwater overdraft reduction through agricultural energy policy: insights from India and México. *Water Resources Development*, Vol. 20, núm. 2, 2004, pp. 149-164.
- SEGAM, Plan de ordenamiento ecológico del valle de Rioverde y Cd. Fernández. Secretaria de Gestión Ambiental. San Luis Potosí. SLP. México, 2000, 232 pp.
- Sophocleous, M., Groundwater recharge and sustainability in the High Plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeology*, núm. 13: 2005, pp. 351-365.
- SRH, Proyecto de zonas de riego. Segunda edición corregida y aumentada. Dirección de Proyectos de Grande Irrigación, Departamento de Canales. México, 1973, 662 pp.
- TACSA, Plan maestro para el mejoramiento de la eficiencia y desarrollo institucional del organismo operador de Rioverde, S.L.P., contrato APA-IHUI-SLP-96-01, Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal. San Luis Potosí, México, 1996, 315 pp.
- United States-México Foundation for Science, Water and health at the U.S.-México border: Science, technology and policy issues. Proceedings from a workshop at Tijuana, Baja California, junio de 1997. Disponible en <http://www.fumec.org.mx> [Consulta: 14 junio 2009]
- Wright, K. y Y. Xu., A water balance approach to the sustainable management of groundwater in South Africa. *Water S.A.*, Vol. 26, núm. 2, 2000, pp 167-170.
- Zaji B., M., Groundwater management perspectives for Borno and Yobe states, Nigeria. *Environmental Hydrology*, Vol. 7, núm. 19, 1999, pp. 1-10.

5 Conclusiones generales

En el estudio del aprovechamiento del agua subterránea de la llanura de Rioverde, pueden distinguirse tres etapas:

La primera, por un incipiente aprovechamiento ante necesidades y requerimientos pequeños, como era el abastecimiento a poblaciones y abrevaderos, satisfechos mediante manantiales, galerías filtrantes (barrenaciones mineras) y pozos a cielo abierto. Posteriormente, el aprovechamiento estuvo marcado por la búsqueda del agua subterránea pues la construcción del Ferrocarril Central Mexicano, hizo necesaria la realización de estudios que permitieran la perforación de pozos para el mantenimiento de las máquinas de vapor; asimismo, instituciones como el Instituto Geológico Minero, realizaron estudios con el fin de encontrar aguas freáticas potables que tuvieran posibilidad de aprovecharse. Cabe mencionar la abundancia de las aguas freáticas descargadas en manantiales y en pozos a cielo abierto a poca profundidad.

La segunda, por el inicio del aprovechamiento del agua subterránea con fines agrícolas y por los esfuerzos institucionales realizados por la Secretaría de Recursos Hidráulicos en nivel federal y del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas en nivel regional, los cuales se enfocaron a realizar un inventario de los aprovechamientos (pozos a cielo abierto, profundos y manantiales), así como de sus características (tecnología, hidrometría, calidad del agua, entre otros). Esta etapa se caracteriza por la transformación de la tecnología, principalmente la de extracción, como fue el cambio de motores de combustión interna y bombas centrífugas hacia motores eléctricos y bombas de turbina; esto repercutió en un incremento en la extracción del agua freática. En las áreas agrícolas los cultivos predominantes fueron el maíz para grano, chile y jitomate, posteriormente se pretende incorporar nuevas áreas al regadío, debido a la supuesta excedencia de manantiales; el incremento del área agrícola y la tecnología de extracción llevó a un desequilibrio en la recarga extracción con consecuencias ambientales, tales como la desaparición de humedales, y la desaparición y reducción de caudales de manantiales, entre otros; la reacción gubernamental ante esta situación fue decretar zonas de veda; sin embargo se constituyó una zona agrícola de gran desarrollo al sur de la llanura de Rioverde.

La tercera, por la búsqueda de más agua, lo que llevó a la evaluación de los acuíferos, en dónde se definieron las características más

importantes de los pozos y los parámetros hidráulicos de los acuíferos, y por el incremento de la superficie irrigada, así como por la transformación de los patrones de cultivos hacia otros más demandantes de agua que los anteriores. Esta etapa se caracteriza por el conocimiento de las áreas de recarga, las fronteras de los acuíferos, la extracción y descarga del agua subterránea, entre otros; en las áreas agrícolas, se transforman nuevamente los patrones de cultivo incorporándose frutales como la naranja y la mandarina, y los forrajes como la alfalfa, además de nuevas tecnologías de extracción como son las bombas sumergibles, lo que ocasiona una mayor extracción, acentuando el déficit. Debido al conocimiento de los acuíferos y de los aprovechamientos se inicia la administración del agua subterránea, con el propósito de revertir los efectos ocasionados por el intenso aprovechamiento, por lo que se inician acciones como la tecnificación de los sistemas de riego, la implementación de medidores, y el control y manejo del agua por organismos no gubernamentales (COTAS); sin embargo, se observa que a pesar de los esfuerzos por las instituciones gubernamentales para reducir el déficit, este tiende a empeorar, debido a una mayor extracción.

Para disminuir los efectos negativos debido al intenso aprovechamiento del agua subterránea, las instituciones gubernamentales se han enfocado fundamentalmente en acciones enfocadas a mejorar la infraestructura hidráulica, sin embargo, acciones como la reforestación,

la conservación de la vegetación nativa, o el manejo de la escorrentía, son escasamente utilizadas.

El aprovechamiento del agua subterránea debe considerarse como un componente del ciclo hidrológico, lo cual garantizaría la persistencia de los áreas agrícolas y de las poblaciones, con mínimos impactos negativos al ambiente.